

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Porovnání vibrační odezvy Mach–Zehnderova a Michelsonova
interferometru**

**Comparison of Vibration Response of Mach-Zehnder and
Michelson Interferometer**

2016/2017

Jaroslav Matějček

Zadání bakalářské práce

Student:

Jaroslav Matějček

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Porovnání vibrační odezvy Mach-Zehnderova a Michelsonova
interferometru
Comparison of Vibration Response of Mach-Zehnder and Michelson
Interferometer

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je sestavení Mach-Zehnderova a Michelsonova interferometru a následné provedení měření. Výstupem závěrečné práce je porovnání obou zkoumaných typů interferometrů z hlediska citlivosti na měřenou veličinu. Body práce:

1. Zpracujte rešerši o uvedených typech vláknově optických interferometrů.
2. Sestavte prototyp Mach-Zehnderova a Michelsonova interferometru.
3. Realizujte interferometrická měření vibrační odezvy pro dopad různých předmětů do měřicí oblasti. Měření proveďte pro oba typy interferometrů.
4. Dle získaných údajů porovnejte oba typy interferometrů.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 0471820539.
2. GOODWIN, Eric P a James C WYANT. Field guide to interferometric optical testing. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006, xii, 100 p. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Zbořil**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 25. dubna 2017


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Ondřeji Zbořilovi za odbornou pomoc, příležitost pracovat s použitým zařízením a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Hlavní náplní této bakalářské práce je tematika světla, optických vláken, interferometrů a s jejich použitím. Interferometry jsou díky své přesnosti měření a citlivosti neustále rozvíjejícím se optoelektronickým oborem a jejich použití je v praxi čím dál větší.

První část práce vysvětlí funkci světla a jeho jevy. Další část je zaměřena na optická vlákna. Popisuje, jak pracují, vysvětluje jejich vlastnosti a rozdělení. Poslední teoretická část zahrnuje bližší seznámení s principem a funkcí Mach-Zehnderova a Michelsonova interferometru a jejich využití v praxi pro snímání vibrací.

Po třech teoretických částech následuje praktická část věnující se dosaženým výsledkům a poznatkům z měření, při kterých jsem zaznamenával a následně vyhodnotil vibrační odezvy jednotlivých interferometrů, které jsem následně porovnal. Celá práce je zakončena a shrnuta závěrem, v němž jsou obsaženy nejpodstatnější poznatky zjištěné během měření.

Klíčová slova

Světlo, optické vlákno, Interferometr, Mach-Zehnderův interferometr, Michelsonův interferometr, Vibrace, Citlivost

Abstract

The main content of this bachelor thesis is a topic of light, optical fibers, interferometers and their use. Interferometers are thanks to their accuracy of measurement and sensitivity a constantly evolving optoelectronic field and their use is even greater in practice.

The first part of bachelor thesis explains the function of light. The next part is focused on optical fibers. It describes how they work, explains their properties and their distribution. The last theoretical part includes a closer acquaintance with the principle and function of Mach-Zehnder and Michelson interferometer and their use in practice for vibration sensing.

After three theoretical parts, the practical part follows. It is dedicated to the results and the findings from the measurements in which I recorded and then evaluated the vibration response of the individual interferometers which I subsequently compared. The whole work is terminated by a summary, where the most important and relevant findings ascertained from the measurement are instated.

Keywords

Light, Optical fiber, Interferometer, Mach-Zehnder interferometer, Michelson interferometer, Vibrations, Sensitivity

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 8 -
Seznam použitých zkratek.....	- 9 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 10 -
Úvod.....	- 12 -
1 Světlo.....	- 13 -
1.1 Historie světla	- 13 -
1.2 Co je to světlo?.....	- 13 -
1.3 Spektrum vlnových délek.....	- 13 -
1.4 Vlastnosti světla a základní vztahy	- 14 -
1.4.1 Rychlost světla	- 14 -
1.4.2 Index lomu.....	- 15 -
1.4.3 Frekvence	- 16 -
1.4.4 Refrakce.....	- 16 -
1.4.5 Difrakce	- 16 -
1.4.6 Polarizace světla	- 16 -
2 Optická vlákna.....	- 18 -
2.1 Charakteristika optických vláken.....	- 18 -
2.2 Princip šíření světla v optických vláknech.....	- 20 -
2.3 Jednovidová vlákna (SM)	- 21 -
2.4 Mnohovidová vlákna (MM).....	- 21 -
2.4.1 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu (MMSI)	- 21 -
2.4.2 Mnohovidová vlákna s postupnou změnou indexu lomu (MMGI)	- 22 -
2.5 Základní parametry a jevy optických vláken	- 23 -
2.5.1 Numerická apertura	- 23 -
2.5.2 Disperze.....	- 23 -
2.5.3 Útlum.....	- 24 -
3 Interferometrické senzory	- 26 -
3.1 Interference	- 26 -
3.2 Princip funkce	- 26 -
3.3 SNR (odstup signálu od šumu)	- 26 -
3.4 Typy interferometrů	- 26 -

3.4.1	Michelsonův interferometr	- 26 -
3.4.2	Mach-Zehnderův interferometr	- 27 -
4	Výsledky měření	- 28 -
4.1	Měření vibrační odezvy na dopadající předměty	- 28 -
4.1.1	Michelsonův interferometr	- 29 -
4.1.2	Mach-Zehnderův interferometr	- 31 -
4.2	Měření vibrační odezvy na reproduktor	- 33 -
4.2.1	Michelsonův interferometr	- 33 -
4.2.2	Analýza průměrných hodnot amplitud pro Michelsonův int.	- 34 -
4.2.3	Analýza SNR pro Michelsonův interferometr	- 37 -
4.2.4	Mach-Zehnderův interferometr	- 41 -
4.2.5	Analýza průměrných hodnot amplitud pro Mach-Zehnderův int.	- 41 -
4.2.6	Analýza SNR pro Mach-Zehnderův interferometr	- 44 -
	Závěr	- 48 -
	Použitá literatura	- 50 -
	Příloha na CD	- 51 -
	Adresářová struktura přiloženého CD:	- 52 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
c	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost světla ve vakuu
λ	nm	Vlnová délka
f	Hz	Frekvence
E	eV	Energie fotonu
h	-	Planckova konstanta
t	s	Čas
n	-	Index lomu
\vec{E}	$V \cdot s^{-1}$	Vektor intenzity el. pole
\vec{B}	T	Vektor magnetické indukce
v	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost v daném prostředí
θ_a	$^\circ$	Maximální úhel
θ_m	$^\circ$	Mezní úhel
NA	-	Numerická apertura
A	db, W	Útlum optického výkonu
P_1	db, W	Vstupní optický výkon
P_2	db, W	Výstupní optický výkon

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
GI	Gradient Index
SM	Single mode
MM	Multimode
MMGI	Multi mode gradient index
MMSI	Multi mode step index
NA	Numerická apertura
SI	Step Index

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Různé pohledy na světlo	13
1.2	Spektrum elektromagnetických vln	14
1.3	Nepolarizované světlo	17
1.4	Polarizované světlo	17
2.1	Struktura optického vlákna	19
2.2	Odraz na rozhraní dvou prostředí	20
2.3	Lom světla	21
2.4	Profil MMSI	22
2.5	Profil MMGI	22
2.6	Vliv disperze na rozšíření impulzů	23
2.7	Vliv útlumu na amplitudu přenášeného signálu	25
3.1	Schéma Michelsonova interferometru	27
3.2	Schéma Mach-Zehnderova interferometru	27
4.1	Uchycení měřicího ramene na skleněné podložce	28
4.2	Odezva při dopadu tenisového míče pro M. int.	29
4.3	Odezva při dopadu plastelíny pro M. int.	30
4.4	Odezva při dopadu pingpongového míčku pro M. int.	30
4.5	Odezva při dopadu tenisového míče pro M-Z int.	31
4.6	Odezva při dopadu plastelíny pro M-Z int.	32
4.7	Odezva při dopadu pingpongového míče pro M-Z int.	32
4.8	Zapojení Michelsonova interferometru	33
4.9	Použitý typ generátoru	34
4.10	Použitý typ teplotního kontroleru	34
4.11	Použitý typ fotodetektoru	34
4.12	Průměrné hodnoty amplitud pro každou frekvenci	36
4.13	Ukázka zašuměného signálu pro 50Hz	39
4.14	Ukázka signálu s nízkou úrovní šumu pro 4000 Hz	39
4.15	Odstup signálu od šumu pro každou frekvenci v dB	40

4.16	Zapojení Mach-Zehnderova interferometru	41
4.17	Průměrné hodnoty amplitud pro každou frekvenci	43
4.18	Ukázka zašuměného signálu pro 50Hz	46
4.19	Ukázka signálu se šumem pro 4000 Hz	46
4.20	Odstup signálu od šumu pro každou frekvenci v dB	47

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
1.1	Indexy lomu různých materiálů	15
4.1	Průměrné hodnoty amplitud pro Michelsonův int.	35
4.2	Průměrné hodnoty amplitud v dB pro Michelsonův int.	37
4.3	Průměrné hodnoty velikosti šumu v dB pro Mich. int.	38
4.4	Průměrné hodnoty amplitud pro Mach-Zehnderův int.	42
4.5	Průměrné hodnoty amplitud v dB pro M-Z int.	44
4.6	Průměrné hodnoty velikosti šumu v dB pro M-Z int.	45

Úvod

Odvětví optických komunikací a vláknově optických interferometrů zaznamenaly za poslední desetiletí enormní nárůst a hojné využití v obrovském spektru nejrůznějších oborů a aplikací. Nárůst využití optických komunikací můžeme odůvodnit především využitím vysokých přenosových rychlostí oproti metalickému vedení, ale taky díky menším rozměrům. Naopak protikladem může být nákladný vývoj a cena použitých přenosových médií a přístrojů pro vybudování optické trasy.

Teoretická část této bakalářské práce se zabývá principy fungování světla, jeho vedení v optických vláknech, samotnými optickými vlákny a na závěr tím hlavním, čím se tato bakalářská práce zabývá a to interferometry.

Praktická část bakalářské práce se věnuje dvěma použitým interferometrům, jejich schémátům a popisem jejich prvků a částí. Druhá část je věnována sestavení jednotlivých interferometrů s použitím již navržených schémat. Poslední částí praktické části jsou měření, která jsou chronologicky seřazena tak, jak byla vykonána. Dále jsou v poslední kapitole znázorněny výsledky v grafické formě a shrnuty v závěru.

Cílem této práce bylo vytvořit teoretickou část na téma světla, optických vláken a interferometrů. Následujícím měřením zjistit, který ze dvou zadaných interferometrů je na vibrace citlivější a vhodnější k měření.

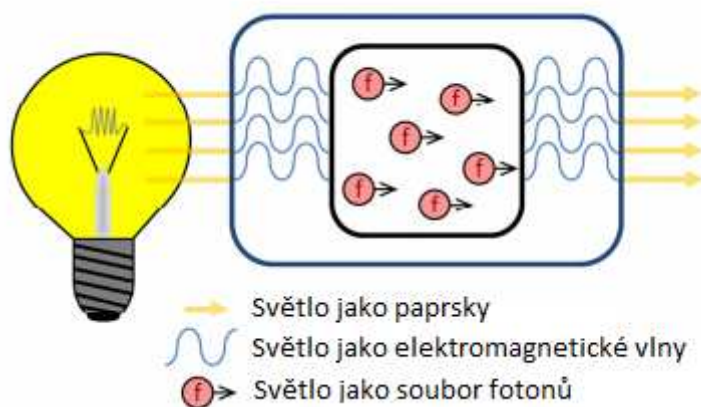
1 Světlo

1.1 Historie světla

V 17. Století vznikaly různé teorie, jak světlo funguje. První teorie byla, že světlo je proud drobných částic šířící se nepředstavitelně velkou rychlostí. Další teorie byla, že se ve vesmíru vyskytuje látka „plenum“, která vyvíjí tlak na oči a díky tlaku vzniká vidění. Později vznikla vlnová teorie světla. Teorie, že světlo tvoří vlny, které vysvětlují např. lom světla při přechodu ze vzduchu do vody. Provedla se řada experimentů, kdy se testoval průchod světla skrz sklo a objevila se barevná škála světla. Na začátku 19. Století byla objevena teorie, že světlo se skládá pouze ze tří barev (červená, zelená a modrá). S těmito poznatky už mohly vznikat teorie o interferenčních a difrakčních jevech a byla zjištěna pravá podstata světla, která definuje světlo jako elektromagnetické záření, jehož povaha je jak vlnová tak i korpuskulární. [1,2]

1.2 Co je to světlo?

Světlo je jednou z forem elektromagnetického záření nebo elektromagnetických vln. Na světlo lze nahlížet několika způsoby. Z pohledu vlnové optiky jako na elektromagnetické vlnění, z pohledu geometrické optiky jako na paprsky nebo také na částice – fotony z pohledu kvantové fyziky. Světlo se skládá z elektrické a magnetické složky. Tyto vlny jsou všude kolem nás, ať už je vidíme nebo ne. Přicházejí v mnoha velikostech. Elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami od několika nanometrů až do stovek metrů. Světlo se chová jako vlna s vlastnostmi jako jsou vlnové délky a frekvence a je předmětem difrakce a interference. [3,4]



Obrázek 1.1: Různé pohledy na světlo [4]

1.3 Spektrum vlnových délek

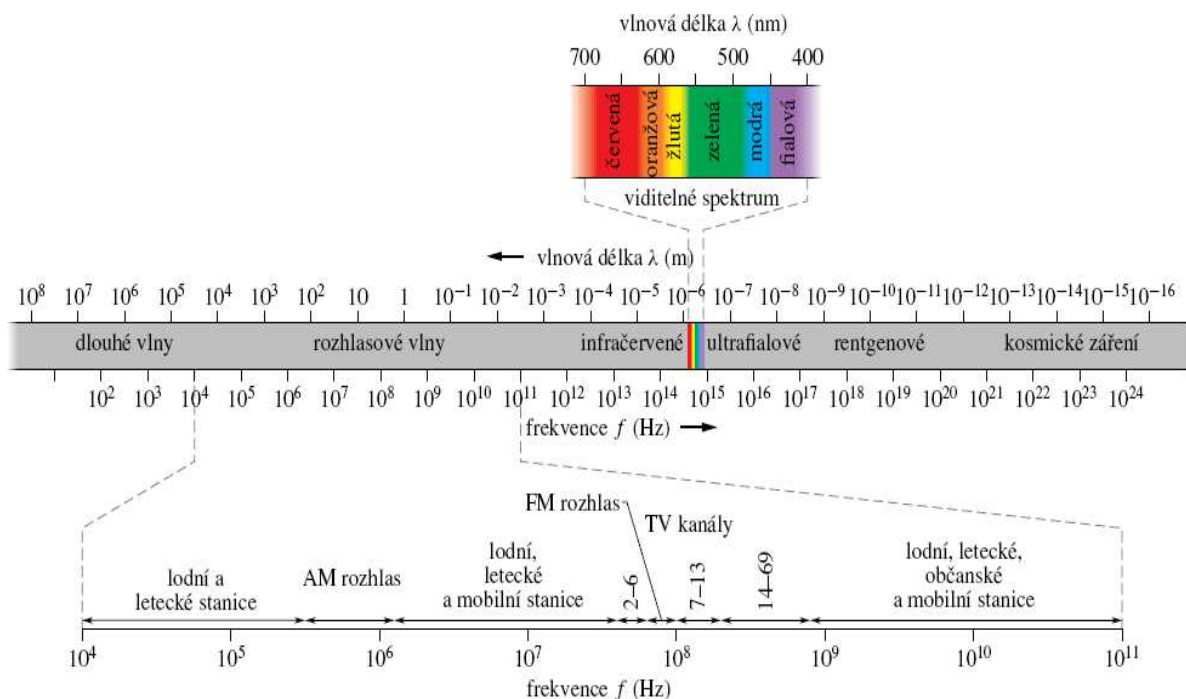
James Clerk Maxwell zjistil, že světelný paprsek je postupná vlna tvořená elektrickým a magnetickým polem. Dříve bylo známo pouze viditelné ultrafialové a infračervené světlo jediným známým druhem elektromagnetických vln. Později byly objeveny rádiové vlny. Jak ukazuje (obr. 1.2), známe nyní široké spektrum elektromagnetických vln. Zasahují nás mikrovlny radarových systémů,

telefonních spojů. Do spektra patří také vlny radioaktivních materiálů a rentgenových přístrojů. Šířka spektra je otevřená a nemá žádné konečné hranice. Jak je vidět na obr. 1.2 - na stupnici vlnových délek reprezentuje každý dílek zvětšení nebo zmenšení vlnové délky či frekvence desetkrát. Viditelná část spektra je vyznačena barvami v oblasti od 700 nm do 400 nm. Lidské oko je nejcitlivější na střed viditelného spektra a to na vlnovou délku 550 nm. Hranice nejsou definovány, protože citlivost lidského oka se asymptoticky blíží k nule. Dále dle rovnice (1.5) závisí rychlost světla v libovolném prostředí na jeho indexu lomu. Z toho plyne, že vlnová délka světla v libovolném prostředí závisí na indexu lomu tohoto prostředí. [3,5]

Vlnovou délku značíme řeckým písmenem lambda a vypočítáme ji vzorcem:

$$\lambda = \frac{c}{f} [m] \quad (1.1)$$

Výpočet vlnové délky λ



Obrázek 1.2: Spektrum elektromagnetických vln [3]

1.4 Vlastnosti světla a základní vztahy

1.4.1 Rychlost světla

Světlo je nejrychlejší jev, jaký byl doposud zpozorován. Ve vakuu se světlo šíří rychlostí c , v jiných látkách se rychlost světla přirozeně liší. Ve vodě se světlo pohybuje přibližně o 30% pomaleji. Důsledkem pohybu fotonu je nenulová energie E , která je definována vztahem (1.2), kde h je Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$) a λ je vlnová délka světla. [4,5]

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Výpočet energie fotonu E

Rychlost světla ve vakuu značíme malým písmenem c a je to konstanta, která má hodnotu:

$$c = 299\,792\,458 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.3)$$

Rychlost světla ve vakuu c

Ve výpočtech a v praxi používáme zaokrouhlenou hodnotu:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.4)$$

Zaokrouhlená hodnota c rychlosti světla ve vakuu

1.4.2 Index lomu

Index lomu světla je bezrozměrná veličina, kterou definujeme jako poměr rychlosti světla ve vakuu c , k rychlosti světla v daném prostředí v . Hodnota indexu lomu prostředí udává vliv daného prostředí na rychlost šířícího se světla v daném prostředí. Čím vyšší je hodnota indexu lomu, tím pomaleji se bude světlo daným prostředím šířit. Světlo se nejrychleji pohybuje ve vakuu, které má index lomu 1. V tabulce 1.1 uvádím pro představu příklady jiných prostředí.

Index lomu vypočteme vzorcem:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.5)$$

Výpočet indexu lomu n

Tabulka 1.1: *Indexy lomu různých materiálů*

Materiál	Index lomu
Vzduch	1.003
Voda	1.33
Sklo	1,5 – 1,9
Sůl	1,52
Diamant	2,42

1.4.3 Frekvence

Frekvence světla je počet vln, které procházejí kolem bodu v prostoru v každém časovém intervalu obvykle za jednu sekundu. Měříme ji v jednotkách cyklů (vlny) nebo v hertzech. Frekvence viditelného světla je označována jako barvy. Pohybuje se od $3,9 \cdot 10^{14}$ hertz (červená) až po $7,9 \cdot 10^{14}$ hertz (fialová). Opět platí, stejně jako u vlnové délky, že plný rozsah frekvencí přesahuje viditelné části. [5]

1.4.4 Refrakce

Refrakce znamená, že se světlo láme, když přechází z jednoho média do druhého. Když světlo vstoupí z jednoho média, které má menší hustotu do druhého, které má větší hustotu, tak se ohýbá směrem ke kolmici na hranici mezi dvěma médii. Čím větší je rozdíl hustoty, tím více se světlo ohýbá. Tato vlastnost se používá v optice, mikroskopech, korekčních čočkách a tak dále. [5]

1.4.5 Difrakce

Světlo necestuje a neprochází v rovných liniích, ale cestuje podobně jako zvukové vlny. Má tendenci se ohýbat např. kolem otvoru, kterým prochází. Difrakci světla si můžeme představit jako proud světla, který prochází klíčovou dírkou, otvorem ve dřevě nebo jako paprsky slunce procházející štěrbinami v mracích. [5]

1.4.6 Polarizace světla

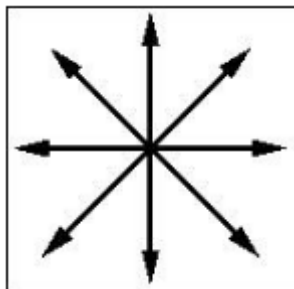
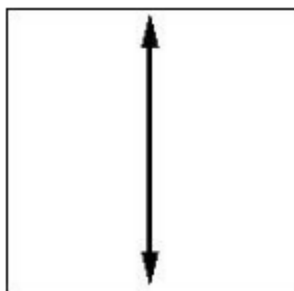
Jak je již uvedeno v kapitole 1.2, světlo je elektromagnetické vlnění, které se skládá ze dvou složek a to z elektrické, která představuje vektor intenzity elektrického pole \vec{E} a magnetické složky, která tvoří vektor magnetické indukce \vec{B} . Obě složky jsou na sebe navzájem kolmé.

Vektor intenzity elektrického pole \vec{E} může kmitat v libovolné rovině. V takovém případě označujeme světlo jako nepolarizované. Pokud kmitá v přesně určené rovině, označujeme světlo jako lineárně polarizované. [9]

Polarizované světlo můžeme získat několika způsoby:

- Odrazem světla
- Lomem světla
- Dvojlomem
- Pomocí polaroidů

Polarizace světla se využívá například v obrazovkách mobilních telefonů a kalkulačcích, které jsou tvořeny kapalnými krystaly. U těchto displejů se používá polarizované světlo k vytvoření obrazu. Polarizace najde své využití i v brýlích, které jednotlivé vektory světla od sebe odděluje.

Obrázek 1.3: *Nepolarizované světlo. Převzato z [9]*Obrázek 1.4: *Polarizované světlo. Převzato z [9]***Polarizace odrazem**

Řekněme, že na rovinné rozhraní dopadá nepolarizované světlo. Víme, že se na tomto rozhraní světlo odrazí pod úhlem podle zákona odrazu světla. Paprsek bude částečně lineárně polarizovaný. Za určitých podmínek může při odrazu nastat i úplná lineární polarizace. Jestliže bude světlo dopadat pod tzv. Brewsterovým úhlem, bude paprsek lineárně polarizován. Velikost Brewsterova úhlu závisí na indexu lomu prostředí, na kterém dochází k odrazu světla. [9]

Polarizace lomem

Pokud světlo dopadá na rozhraní dvou prostředí, tak světlo, které se šíří dál druhým prostředím, projde částečně polarizováno. Úplné polarizace lomem nejde docílit. [9]

Polarizace dvojlomem

K polarizaci dvojlomem dochází např. ve vápenci nebo křemenu. Světlo dopadající na materiál se při průchodu rozdělí na dva paprsky – řádný a mimořádný. Řádný paprsek se řídí Snellovým zákonem lomu, který je popsán v kapitole 2.2. Mimořádný paprsek se Snellovým zákonem lomu neřídí. Oba paprsky jsou úplně lineárně polarizované. [9]

Polarizace polaroidem

Polaroid je speciálně vytvořený filtr. Filtr tvoří dvě vrstvy průhledného plastu, mezi nimiž je látka s dlouhými molekulami, které jsou speciálně srovnány, aby jejich podlouhlé osy byly rovnoběžné. Jestliže pak polaroidem prochází nepolarizované světlo, dochází v jednom směru k pohlcení intenzity elektrického pole. [9]

2 Optická vlákna

2.1 Charakteristika optických vláken

Optická přenosová média jsou tvořena skleněnými nebo plastovými vlákny určenými k přenosu signálu. Optické kabely mohou být tvořeny jedním nebo až stovkami vláken, které jsou tenké jako jedna osmina šířky lidského vlasu. Optická vlákna jsou hojně využívána v telekomunikacích, kde jsou schopny při přenosech na dlouhé vzdálenosti nabídnout vysokou rychlost jako žádné jiné přenosové médium.[3,6]

Metalická vlákna jsou postupně nahrazována vlákny optickými z několika důvodů:

- Nízké ztráty
- Odolnost vůči přeslechu a elektromagnetickému rušení
- Malé rozměry a hmotnost
- Vysoká přenosová rychlost
- Spolehlivost

Na druhou stranu mají optická vlákna i několik nevýhod:

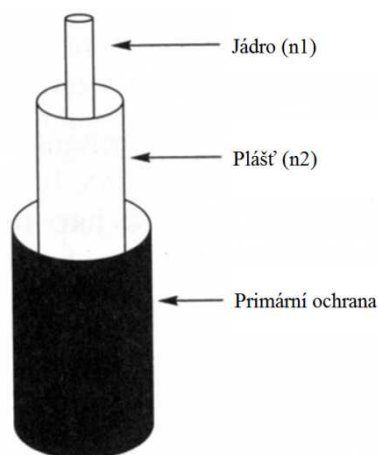
- Náročná údržba
- Cena přístrojů a součástí potřebných pro práci s vlákny
- Makroohyby, mikroohyby

Každý typ optického vlákna rozdělujeme na skupiny:

- Jednovidová optická vlákna (Single Mode – SM)
 - Se skokovou změnou indexu lomu (Step Index – SI)
- Mnohovidová optická vlákna (Multi Mode – MM)
 - Se skokovou změnou indexu lomu (Step Index – SI)
 - S postupnou změnou indexu lomu (Gradient Index – GI)

Optická vlákna se skládají z:

- Jádru
- Pláště
- Ochranná vrstva



Obrázek 2.1: *Struktura optického vlákna. Překresleno z [6]*

Jádro

- Jádro optického vlákna je uloženo v obalu (plášti). Jádro je vyrobeno buď z plastu, nebo ze skla. Index lomu jádra n_1 musí být vyšší než index lomu pláště n_2 . Toto je nezbytná podmínka. Aby mohlo docházet mezi jádrem a pláštěm k totální reflexi, musí paprsek dopadnout na rozhraní jádra a pláště pod menším úhlem než je úhel kritický. Paprsek, který dopadne pod vyšším úhlem, se odrazí jen částečně. Zbytek energie se uvolní do pláště a z pláště ven. Jednovidová vlákna mají zpravidla průměr jádra od 4 do 10 mikrometrů. U mnohovidových vláken se tato hodnota pohybuje okolo 50 – 62,5 mikrometrů. [4,6]

Plášť

- Opláštění optického vlákna je jedna z vrstev vlákna, která má index lomu n_2 nižší než index lomu jádra n_1 . Funkce pláště je poskytnout jádru nižší index lomu za účelem efektivního přenosu světla optickým vláknem. Průměr pláště je zpravidla 125 mikrometrů. [4,6]

Ochranná vrstva

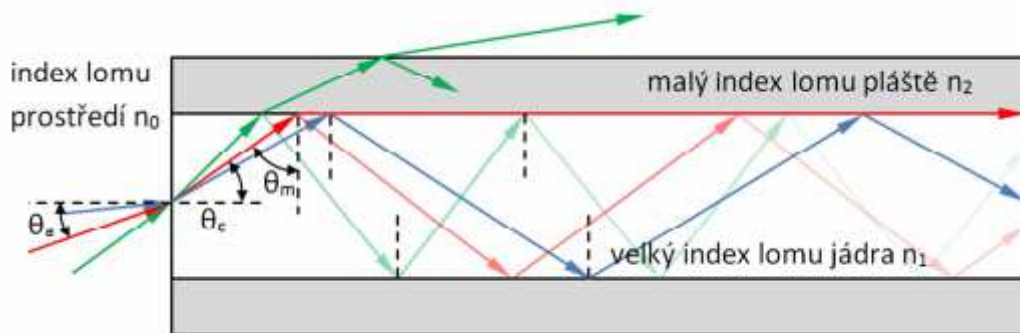
- Ochranná vrstva optického vlákna je další z částí optického vlákna. Jejím účelem je poskytovat ochranu optickému vláknem. Chrání optické vlákno před mechanickým poškozením, mikroohyby, makroohyby. [4,6]

2.2 Princip šíření světla v optických vláknech

Optická vlákna jsou založena na úplném odrazu světla. Uvažujeme dvě prostředí n_1 a n_2 . Dopadá-li světlo na rozhraní těchto dvou prostředí, dojde k lomu a odrazu světla. Za určitých podmínek může však dojít pouze k odrazu.

Mezní úhel, pod kterým můžeme navázat světlo do optického vlákna, naznačuje úhel θ_a v obr. 2.2. Je to maximální možný úhel, pod kterým může být světelný paprsek do optického vlákna zachycen tak, aby byl nadále veden. Navázání světelného paprsku do optického vlákna popisuje Snellův zákon (2.2).

Pokud přechází světlo z opticky hustšího prostředí n_1 (jádro) do opticky řidšího prostředí n_2 (plášť) pod vyšším úhlem než je úhel mezní θ_m , který lze vypočítat dle (2.1), dojde k totálnímu odrazu na rozhraní těchto dvou prostředí. Na obr. 2.2 můžeme vidět, že modrý paprsek demonstruje totální odraz, a tak prochází vláknem na vysoké vzdálenosti s nízkými ztrátami. Zelený paprsek nesplňuje podmínku totálního odrazu a je z optického vlákna vyvázán. Červený paprsek demonstruje takový paprsek, který se šíří mezním úhlem na rozhraní jádra a pláště. [3,6]



Obrázek 2.2: Odraz na rozhraní dvou prostředí. Převzato z [4]

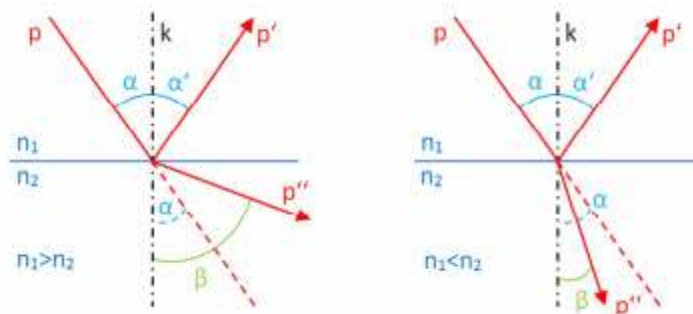
$$\alpha_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

Výpočet mezního úhlu [4]

Pokud se světlo šíří prostředím, které není homogenní, mezi prostředími s odlišnými indexy lomu, dochází k odrazu a k lomu světla. Pro lom světla platí rovnice (2.2). Tento vztah se označuje jako Snellův zákon. Snellův zákon říká, že při přechodu paprsku p světla z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí, nastává lom světla směrem ke kolmici k . Na druhou stranu při přechodu z opticky hustšího prostředí do prostředí opticky řidšího, nastává lom paprsku p světla směrem od kolmice k . Lom světla je naznačen na obr. 2.3 [3,4]

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.2)$$

Snellův zákon [4]



Obrázek 2.3: Lom světla. Převzato z [4]

2.3 Jednovidová vlákna (SM)

Jednovidová vlákna mají úzké jádro, které umožňuje přenášet pouze jeden paprsek světla. Z tohoto důvodu v jednovidových vláknech dochází k méně odrazům světla než u vláken mnohovidových, eliminují vidovou disperzi. Jednovidová vlákna minimalizují útlum a vytváří možnost přenosu na vyšší vzdálenosti. Pro své přenosové vlastnosti jsou hojně využívána pro pátevní síť, přenosy na dlouhé vzdálenosti atd. Důležitá podmínka je, že index lomu jádra musí být větší než index lomu pláště. [3,4]

Výhody jednovidových vláken:

- Vysoká přenosová rychlost
- Pokles útlumu a vlnové disperze
- Dosah na vyšší vzdálenosti

Nevýhody jednovidových vláken:

- Vyšší náchylnost k mikro a makroohybům
- Složitější a dražší výroba oproti mnohovidovým

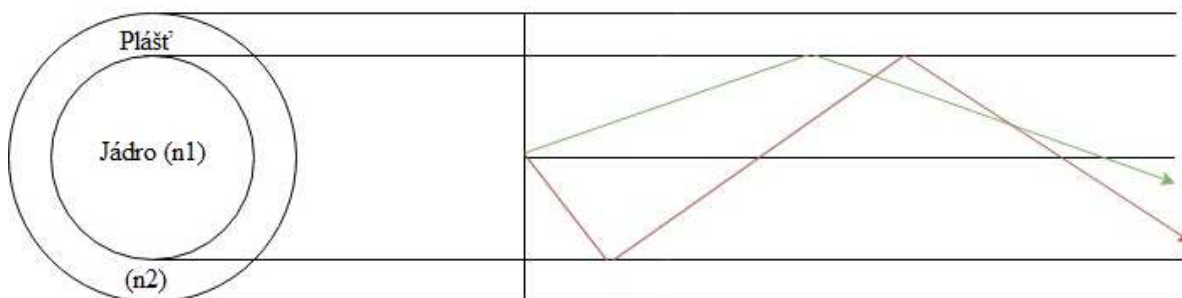
2.4 Mnohovidová vlákna (MM)

Mnohovidová optická vlákna mají širší jádro, které umožňuje přenášet více paprsků naráz. Z tohoto důvodu se zvyšuje počet odrazů světla, které prochází skrz jádro. Vzhledem k tomu, že v mnohovidových vláknech dochází k více odrazům než v jednovidových, zvyšuje se vidová chromatická disperze a útlum. Z tohoto důvodu není vhodné MM vlákna používat na vyšší vzdálenosti a taky proto, že nedosahují vysokých přenosových rychlostí. Opět zde platí, že index lomu jádra musí být větší než index lomu pláště. [3,4] MM vlákna se rozdělují do dvou základních skupin:

2.4.1 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu (MMSI)

Jak můžeme vidět na obr. 2.4, v tomto typu MM vlákna se světlo šíří na principu totálního odrazu, což je způsobeno skokovou změnou indexu lomu pláště. Každý paprsek se šíří jinak, jinou

dráhou, a proto se každý paprsek dostane ke konci trasy v jiný časový okamžik, čímž je způsobena disperze. [6]



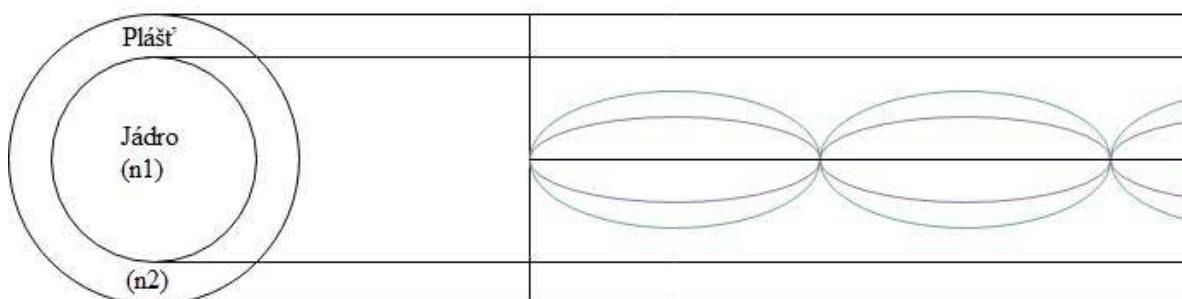
Obrázek 2.4: Profil mnohovidového vlákna se skokovou změnou indexu lomu. Překresleno z [6]

Vlastnosti MMSI:

- Vysoká náchylnost vůči vlnové disperzi
- Vysoký vznik útlumu
- Malá přenosová kapacita
- Nevhodnost využití na dlouhé trasy

2.4.2 Mnohovidová vlákna s postupnou změnou indexu lomu (MMGI)

Mnohovidová vlákna s postupnou změnou indexu lomu (MMGI) obsahují jádro, ve kterém se index lomu postupně zmenšuje směrem od středové osy k opláštění, jak je vidět na obr 2.5. To znamená, že tyto vlákna mají více než 2 prostředí a nemají skokovou změnu na rozhraní jádra a pláště. Vidy cestují ve křivkách a neodrážejí se na rozhraní jádra a pláště jako je to u MMSI. Sice paprsky cestují pomaleji, protože prochází hustším prostředím, ale vlivem cestování ve křivkách (světlo se ohýbá vlivem postupné změny indexu lomu) dochází k potlačení disperze. Tím, že paprsky necestují na principu totálního odrazu, dochází taky ke zkracování vzdálenosti, kterou musí na své cestě urazit. [6]



Obrázek 2.5: Profil mnohovidového vlákna s postupnou změnou indexu lomu. Překresleno z [6]

2.5 Základní parametry a jevy optických vláken

2.5.1 Numerická apertura

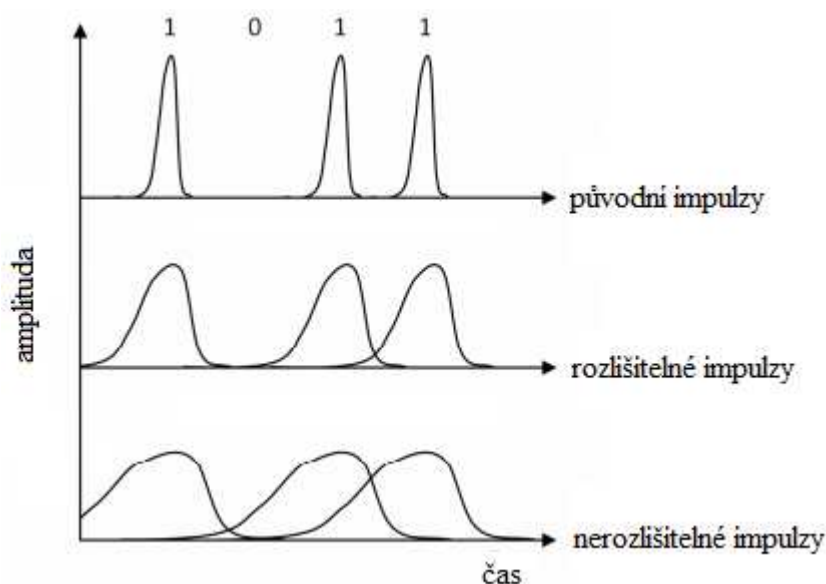
Numerická apertura je parametr, jenž je popsán vzorcem (2.3) a značící se NA, definuje nejvyšší úhel, pod kterým může paprsek vstoupit do optického vlákna tak, aby mohl být přenesen. Číselně se numerická apertura rovná maximálnímu sinusu úhlu, pod kterým je možno paprsky přenést optickým vláknem od jeho začátku po jeho konec. Paprsky, které budou vstupovat do vlákna pod vyšším úhlem, než je maximální sinus numerické apertury, se nebudou moci vláknem šířit. [4,6]

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.3)$$

Výpočet numerické apertury [1]

2.5.2 Disperze

Disperze je v oblasti optických komunikací nežádoucí jev, při kterém dochází ke zkreslení signálu, omezení maximální přenosové rychlosti a změně jejich tvaru. Vliv disperze je znázorněn na obr. 2.6. Je zde vidět, že vlivem disperze se pulzy v čase roztahují a stávají se nerozpoznatelnými. Disperze tedy určuje mezní frekvenci, kdy jsou původní impulzy možné přenést bez deformace. [6]



Obrázek 2.6: Vliv disperze na rozšíření impulzů. Překresleno z [4]

Disperze se rozděluje na 4 základní druhy:

- Materiálová disperze
- Vidová disperze
- Chromatická disperze
- Polarizační disperze

Materiálová disperze

Materiálová disperze vzniká z důvodu, že světlo je složeno ze spousty vlnových délek a jednotlivé vlnové délky se ve skle šíří různou rychlostí. [3]

Vidová disperze

Vidová disperze se vyskytuje v mnohovidových vláknech. Vidová disperze způsobuje, že každý paprsek dorazí na výstup z vlákna s jinou amplitudou, s rozšířenými pulzy než do vlákna vstupovaly. Jednotlivé paprsky dorazí v jiném časovém okamžiku. Vidovou disperzi lze potlačit užitím jednovidových vláken nebo gradientních vláken. [3,6]

Chromatická disperze

Každé záření vedené optickým vláknem má určité spektrum vlnových délek a každá jiná vlnová délka se šíří optickým vláknem jinou přenosovou rychlostí a lomí se na rozhraní pod různými úhly. To způsobuje, že na výstupu mnohovidového vlákna mají jednotlivé složky spektra časově posunuté oproti spektru na vstupu do vlákna. [3,6]

Polarizační disperze

Polarizační disperze se vyskytuje u jednovidových vláken. Jediný paprsek šířící se jednovidovým vláknem cestuje ve dvou na sebe kolmých rovinách. Jakákoliv nesymetrie optického vlákna se tedy projeví na přenosu a může jednotlivé polarizační roviny změnit tak, že nebudou symetrické. Tento jev může nastat například mikroohyby, makroohyby nebo chybou ve výrobě optického vlákna. [3,6]

2.5.3 Útlum

Všechny vlnovody a vlákna vykazují vlivem použitých materiálů, součástek, disperze a nedokonalostí při výrobě útlum. Útlum rozdělujeme na geometrický a materiálový.

Mezi geometrické ztráty řadíme útlum vznikající mikroohyby a nedokonalostmi při výrobě vláken.

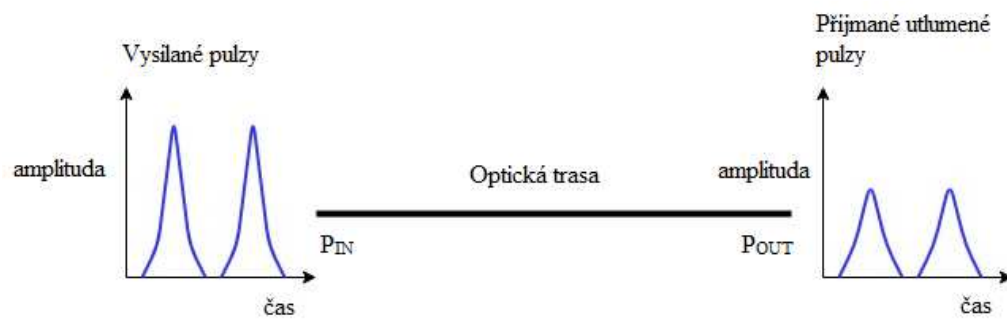
Mezi materiálové ztráty řadíme útlum vznikající nečistotami, použitými spojkami, konektory a sváry.

Vlivem útlumu dochází k narušení totálního odrazu uvnitř vláken a k poklesu amplitudy přenášeného signálu.

Útlum vyjadřuje hodnotu těchto ztrát v přenosu a vypočítá se dle vztahu (2.4). [4]

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) [dB, W] \quad (2.4)$$

Útlum optického výkonu [5]



Obrázek 2.7: Vliv útlumu na amplitudu přenášeného signálu. Překresleno z [3,6]

3 Interferometrické senzory

3.1 Interference

Dvě elektromagnetické vlny, které společně a zároveň dosáhnou určitého místa, spolu interferují (skládají se). Skládání se nazývá interference. Podmínkou je, aby dopadající vlnění byla koherentní. Koherentní jsou dvě světelné vlny stejné frekvence, jejíž fázový rozdíl je konstantní – nemění se s časem. [10]

3.2 Princip funkce

Optické interferometry jsou přístroje pro velmi přesná měření, princip interferometrů je založen na interferenci světla. Interferometry využívají velmi krátkých vlnových délek na úrovni stovek nanometrů a tak lze při interferenci rozlišit extrémně malé změny veličin, jako jsou délka trasy, index lomu, rychlost šíření a celá řada dalších veličin.

Základním principem interferometrů je dělení a slučování. Za světelného zdroje, např. laseru, vstupuje paprsek do děliče, kde dojde k rozdělení světelného paprsku na více svazků, dále svazky urazí určitou vzdálenost a vstupují společně do coupleru, kde dojde k opětovanému sloučení. [7]

3.3 SNR (odstup signálu od šumu)

Odstup signálu od šumu je hodnota, která vyjadřuje, jak moc je daný signál ovlivněn šumem. SNR je definováno jako poměr výkonu signálu P_S a šumu v pozadí P_N . [11]

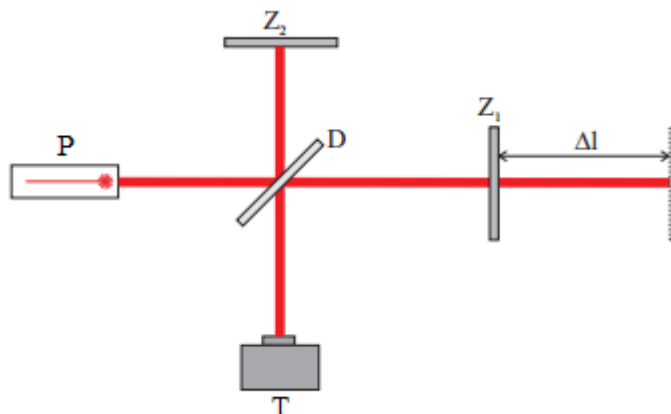
Matematicky zapisujeme ve tvaru rovnice (4.1):

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (4.1)$$

3.4 Typy interferometrů

3.4.1 Michelsonův interferometr

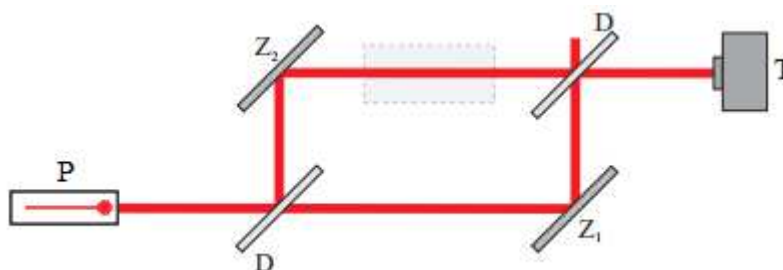
Jedná se o nejznámější dvousvazkový interferometr. Základní princip je znázorněn na obrázku obr. 3.1. Uvažujeme světlo, které vychází z bodu P a dopadá na dělič svazku D. Je jím zrcadlo, které propouští polovinu dopadajícího světla a odráží zbytek. Podle obrázku pro jednoduchost předpokládáme, že má zanedbatelnou tloušťku. Na děliči D se tedy světlo rozdělí na dvě vlny. Jedna (měřicí větev) postupuje po průchodu děličem k zrcadlu Z_1 , druhá je odražena děličem směrem k pohyblivému zrcadlu Z_2 . Na zrcadlech se vlny odrážejí a vracejí se zpět podél směrů dopadů a nakonec vstupují společně do dalekohledu T. Pozorovatel vidí strukturu zakřivených nebo přímých interferenčních proužků. [3]



Obrázek 3.1: Schéma Michelsonova interferometru. Převzato z [8]

3.4.2 Mach-Zehnderův interferometr

Druhý typ interferometru je taktéž dvousvazkový. Mach-Zehnderův interferometr se skládá ze dvou zrcadel a dvou děličů svazků, jak je vidět na obr. 3.2. Uvažujeme světlo, které vychází z bodu P a je prvním děličem D rozděleno na dvě vlny – měřící a referenční. Obě tyto vlny dále postupují po svých dráhách na druhý dělič svazků D. Pokud je optická dráha obou svazků identická, na fotodetektoru T uvidíme maximální intenzitu – konstruktivní interference. Pokud dojde ke změně optické dráhy v jednom ze svazků, dojde k posuvu fáze jedné z vln a tudíž i ke změně intenzity na fotodetektoru. [7,8]



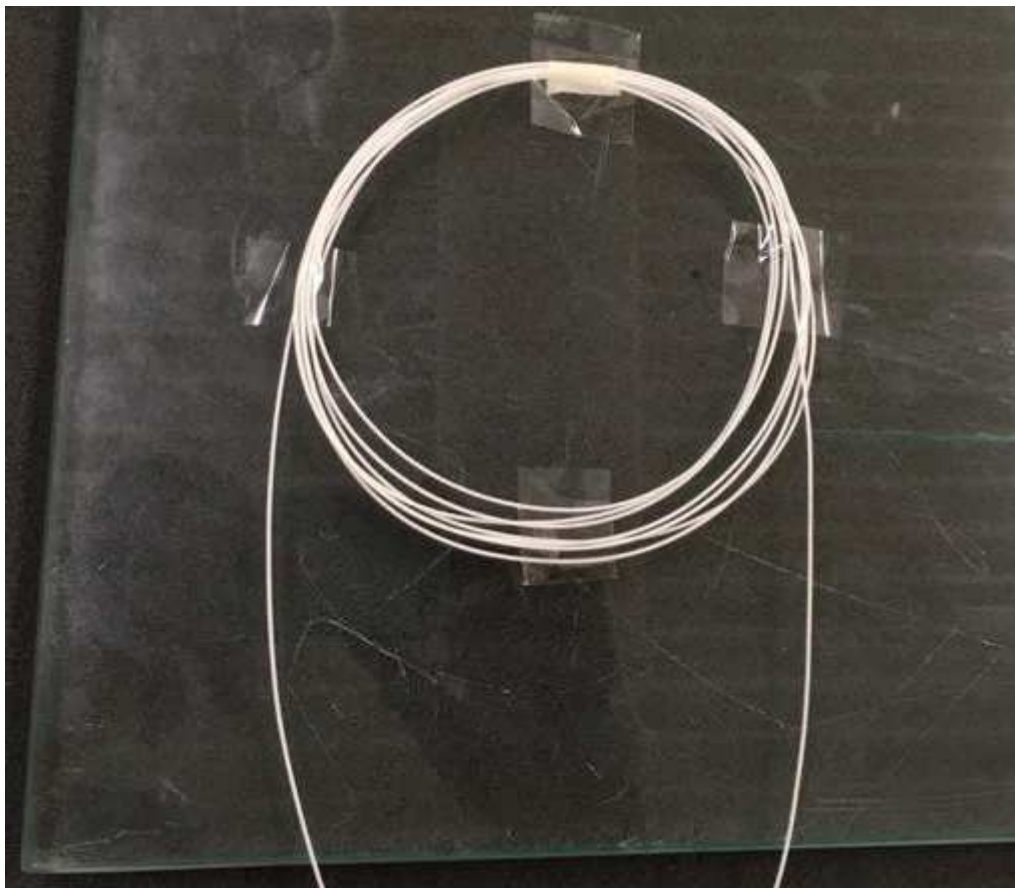
Obrázek 3.2: Schéma Mach-Zehnderova interferometru. Převzato z [8]

4 Výsledky měření

Praktická měření jsou rozdělena na dvě části. První část se věnuje měření vibrační odezvy na dopadající předměty. Odezvy byly u obou interferometrů velmi podobné, a tak pro porovnávání dvou typů interferometrů nevhodné. Proto po dohodě s vedoucím této práce bylo zadání rozšířeno o další měření vibrační odezvy na rozsahu 20 – 4000 Hz, které bylo realizováno pomocí reproduktoru a generátoru funkcí, kde byly výsledky měření u obou interferometrů odlišné a proto lepší pro následné srovnání citlivosti.

4.1 Měření vibrační odezvy na dopadající předměty

Tato část závěrečné práce se zabývá měřením vibrační odezvy na dopadající předměty. Jako podložka byla zvolena skleněná tabule o tloušťce 5 mm. Na ni byla postupně uchycena měřící ramena obou typů interferometrů, jak je vidět na obr. 4.1.



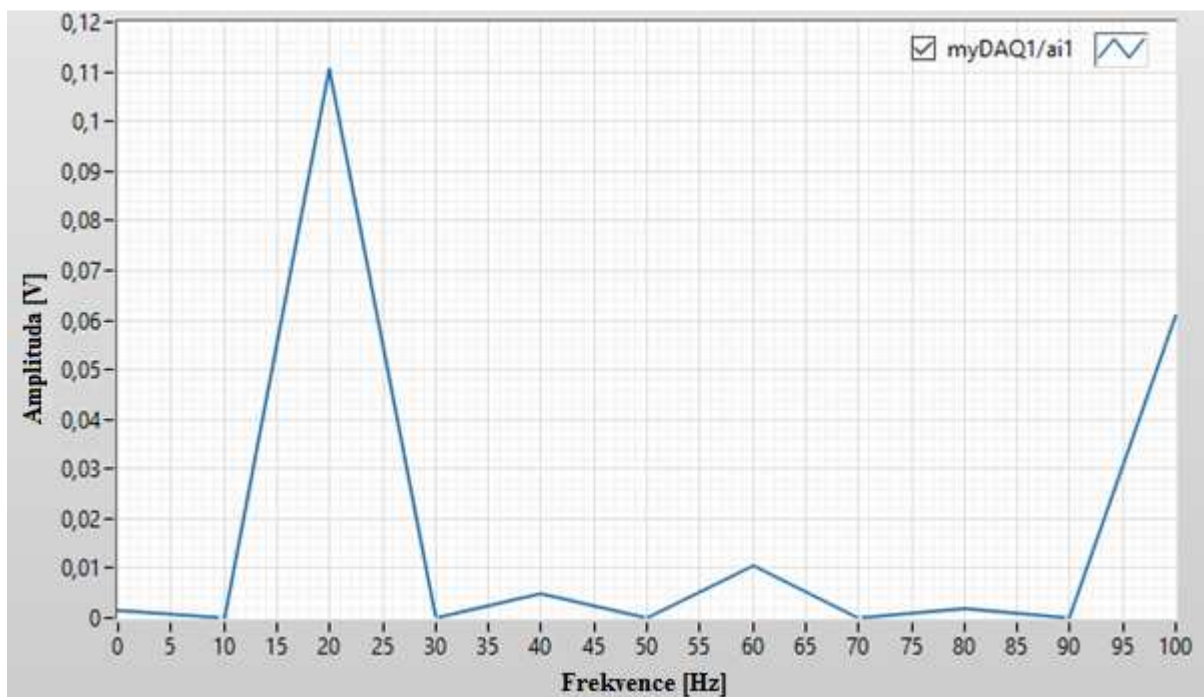
Obrázek 4.1: Uchycení měřícího ramene na skleněné podložce

Do měřicí plochy byly z výšky jednoho metru postupně pouštěny kulaté předměty různých velikostí, což vyvolalo vibrační odezvu na podložce, která byla snímána měřícím ramenem interferometru. Níže uvádím seznam použitých předmětů pro testování:

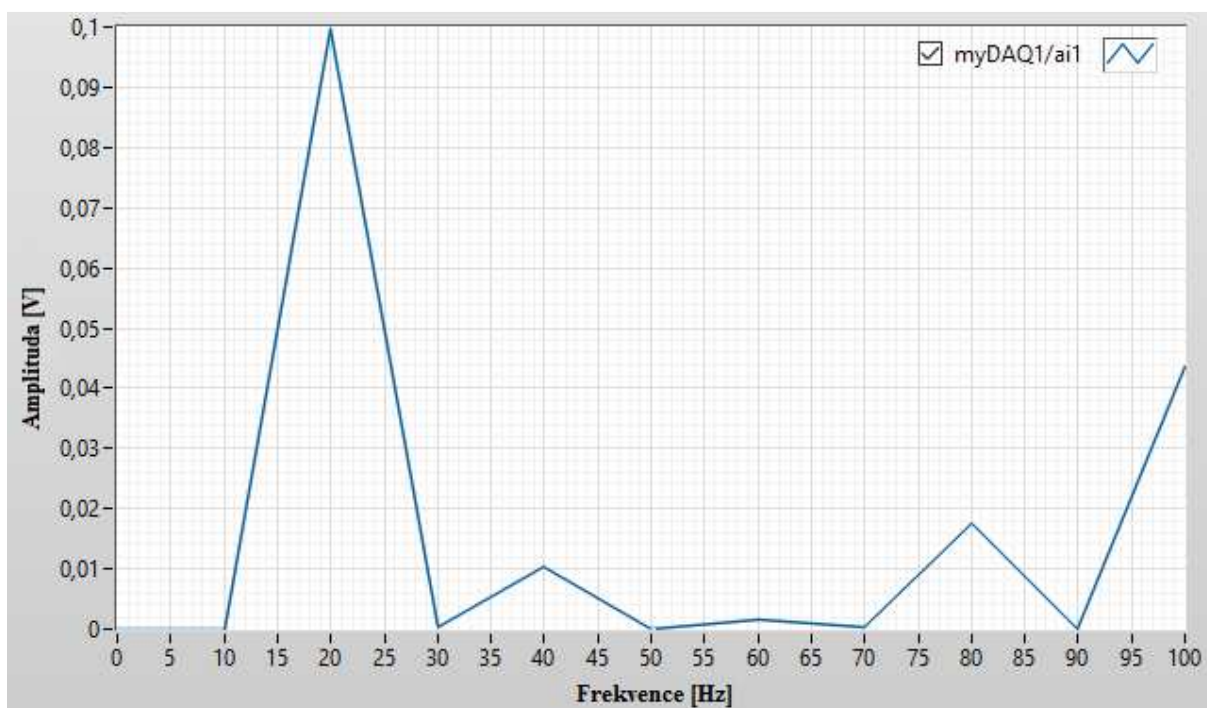
- Tenisový míč o hmotnosti 57 gramů a průměru 64 mm
- Plastelínová kulička o hmotnosti 20 gramů a průměru 30 mm
- Pingpongový míček o hmotnosti 2,7 gramů a průměru 44 mm

4.1.1 Michelsonův interferometr

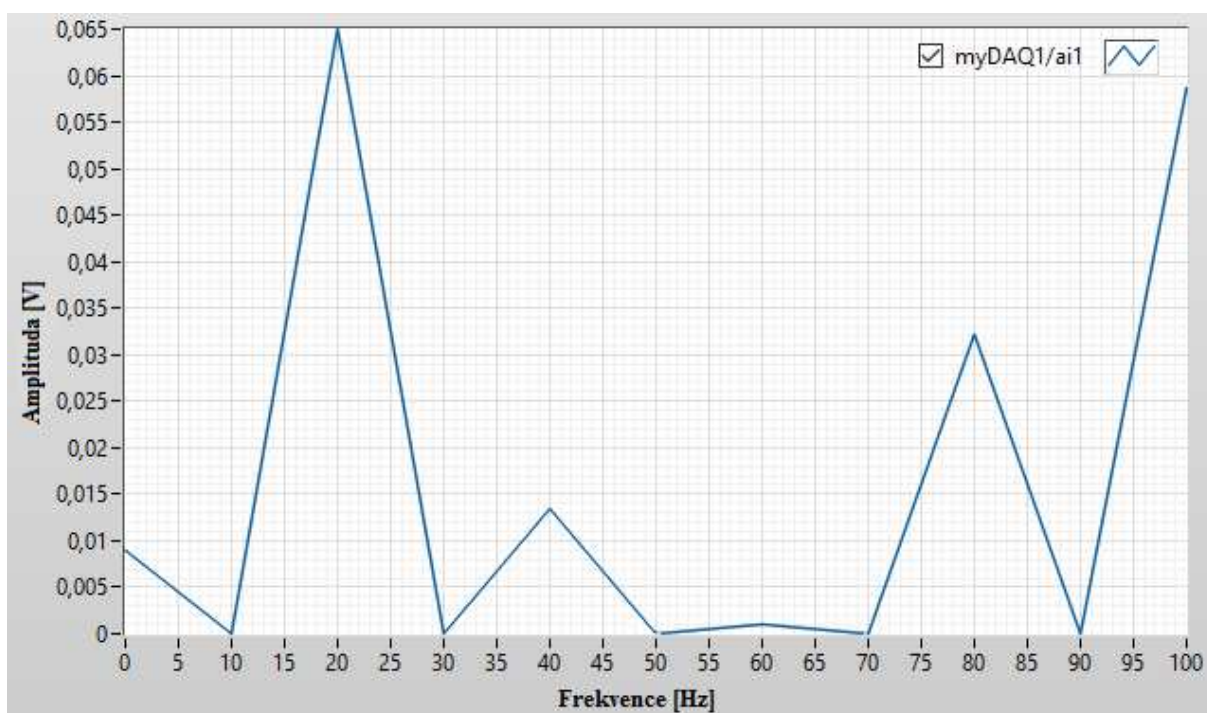
Pro měření Michelsonovým interferometrem jsem určil délku obou ramen 2,5 m. Učinil jsem tak z důvodu zachování stejné délky měřících ramen obou interferometrů, aby porovnání interferometrů bylo co nejpřesnější. Prvním krokem bylo ramena vytvořit. Vytvořil jsem ramena svařením pigtailů a zrcadel. První zrcadlo je uchyceno a izolováno od vibrací na stojanu. Druhé zrcadlo je uzavřeno a izolováno v kazetě společně s druhým referenčním ramenem. Do obvodu je navázán paprsek generován laserem.



Obrázek 4.2: Odezva při dopadu tenisového míče pro M. int.



Obrázek 4.3: Odezva při dopadu plastelíny pro M. int.

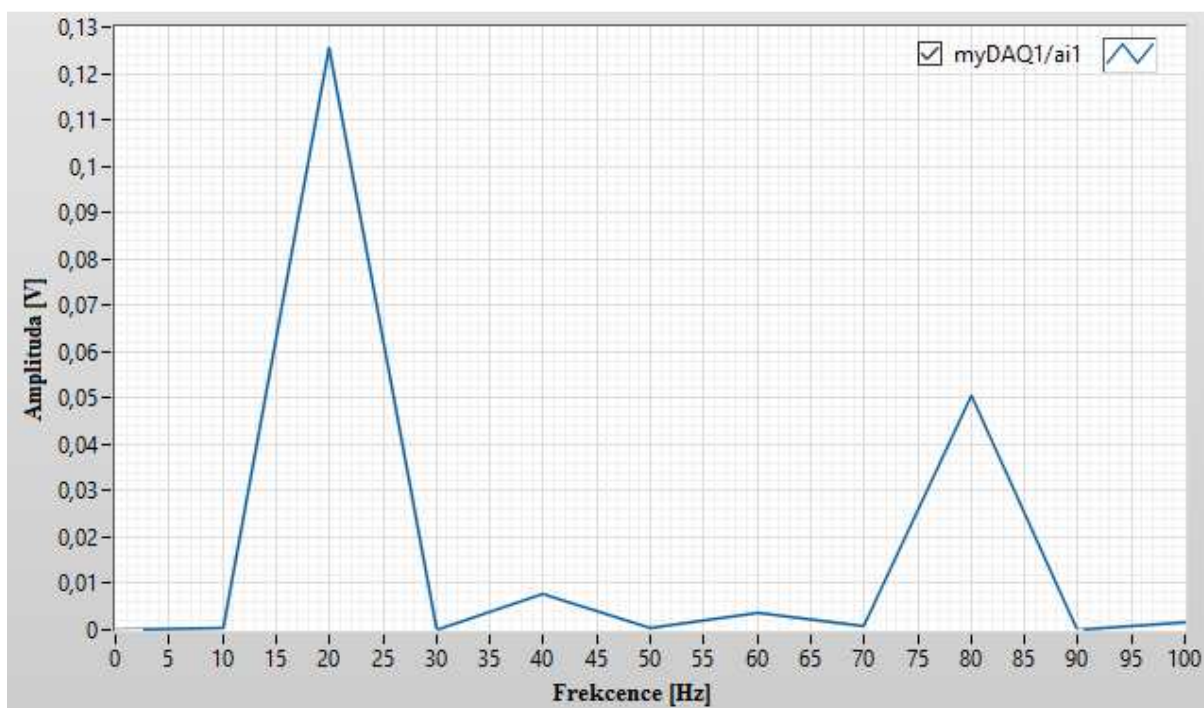


Obrázek 4.4: Odezva při dopadu pingpongového míčku pro M. int.

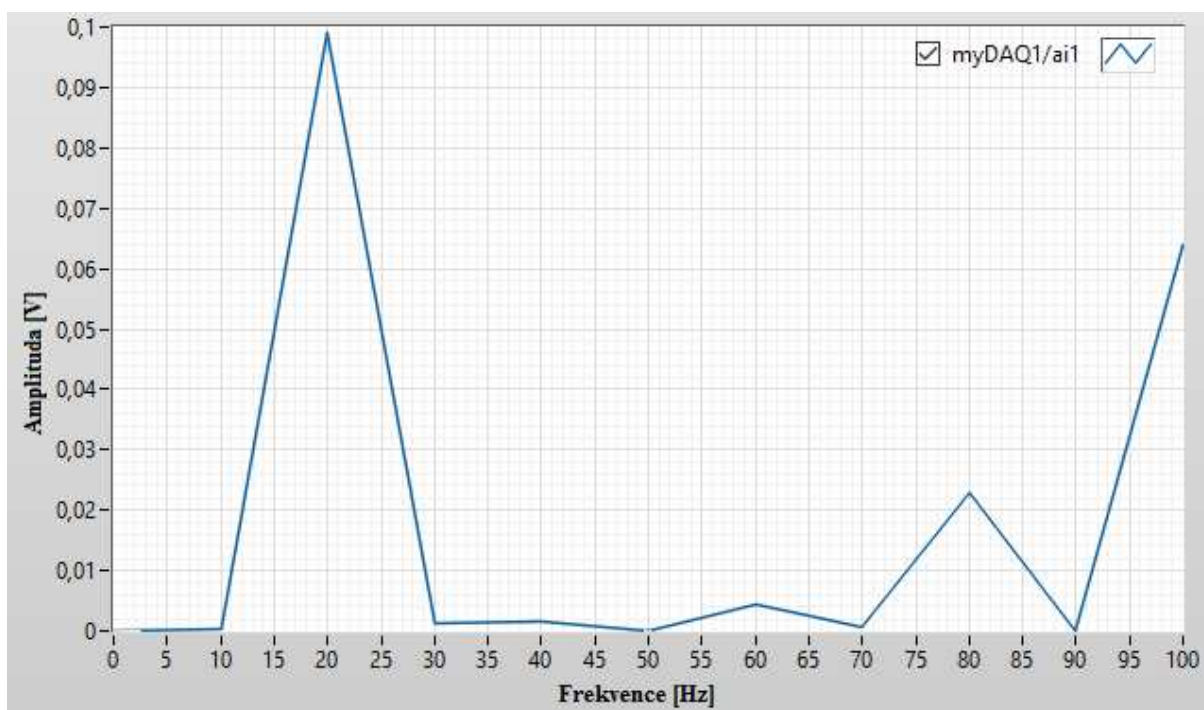
Z měření vyplývá, že největší vibrační odezvy bylo dosaženo po dopadu tenisového míče. Nejmenší odezvu vyvolal dopad pingpongového míčku. Dopad předmětů se nejvíce projevil na frekvenci 20 Hz. V grafech jsou dále vidět i vyšší harmonické frekvence.

4.1.2 Mach-Zehnderův interferometr

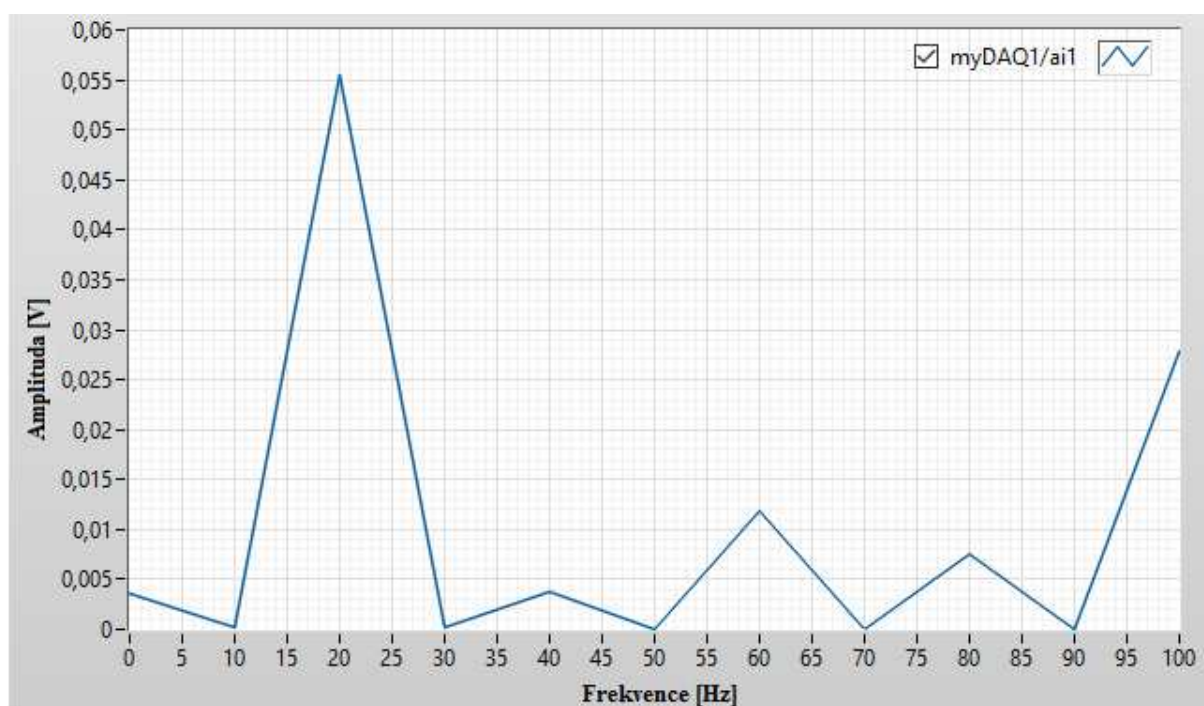
Pro měření Mach-Zehnderovým interferometrem jsem určil délku ramena 5 m. Učinil jsem tak, abych zachoval stejnou délku, kdy u Michelsonova interferometru jsou ramena dvě s délkou 2,5 m. Zapojení jde vidět na obr. 4.8, kde jsem použil jako zdroj světla laser, který jsem vedl skrz cirkulátor. Cirkulátor byl použit z důvodu zachování stejných podmínek obou zapojení. Světlo je dále vedeno přes coupler, který světlo dělí na dva optické svazky – měřicí a referenční. Měřicí paprsek putuje do měřicího ramena, které je připevněno ke skleněné podložce. Referenční rameno je zapouzdřeno v kazetě. Oba paprsky se opět slučují couplerem a putují do fotodetektoru obr. 4. 11, který snímá vibrace.



Obrázek 4.5: Odezva při dopadu tenisového míče pro M-Z int.



Obrázek 4.6: Odezva při dopadu plastelíny pro M-Z int.



Obrázek 4.7: Odezva při dopadu pingpongového míčku pro M-Z int.

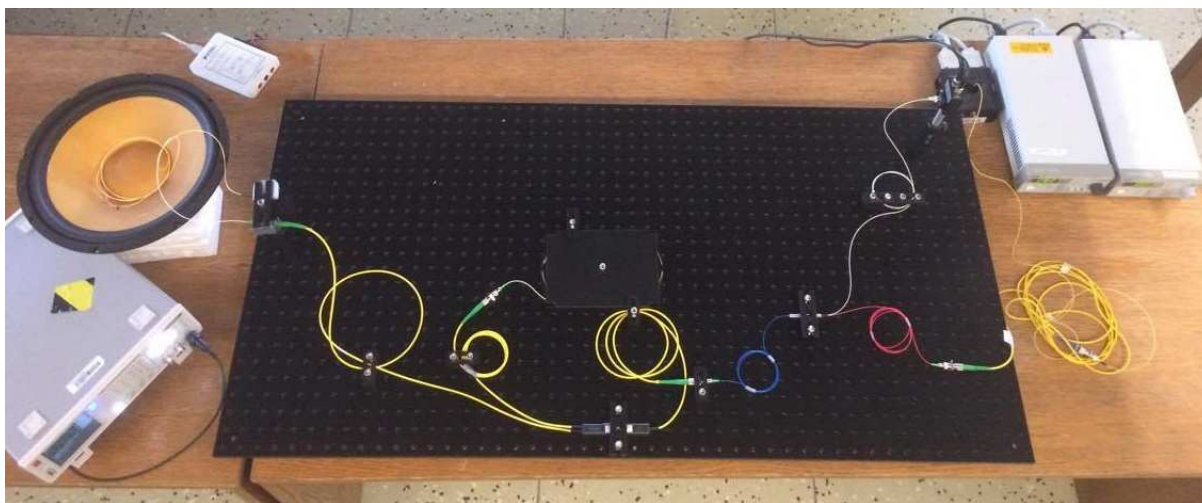
Z měření vyplývá, že největší vibrační odezvy bylo dosaženo po dopadu tenisového míče, stejně jako Michelsonova interferometru. Nejmenší odezvu také vyvolal dopad pingpongového míčku.

Dopad předmětů se nejvíce projevil na frekvenci 20 Hz. Z analýzy výsledků vyplynulo, že Mach-Zehnderův interferometr je mírně citlivější než první typ interferometru, avšak rozdíly jsou minimální.

4.2 Měření vibrační odezvy na reproduktor

4.2.1 Michelsonův interferometr

Pro měření Michelsonovým interferometrem jsem použil totožné zapojení, jako pro měření vibrační odezvy při dopadu předmětů. Jediným rozdílem je, že měřící rameno není připevněno na skleněné desce, ale je položeno na reproduktoru jak je vidět na obr 4.8.



Obrázek 4.8: *Zapojení Michelsonova interferometru.*



Obrázek 4.9: *Použitý typ generátoru*



Obrázek 4.10: Použitý typ driveru pro stabilizaci

Pro generaci světla byl použit DFB laser o vlnové délce 1550 nm a dva drivery pro teplotní a proudovou stabilizaci (obr. 4. 10.).



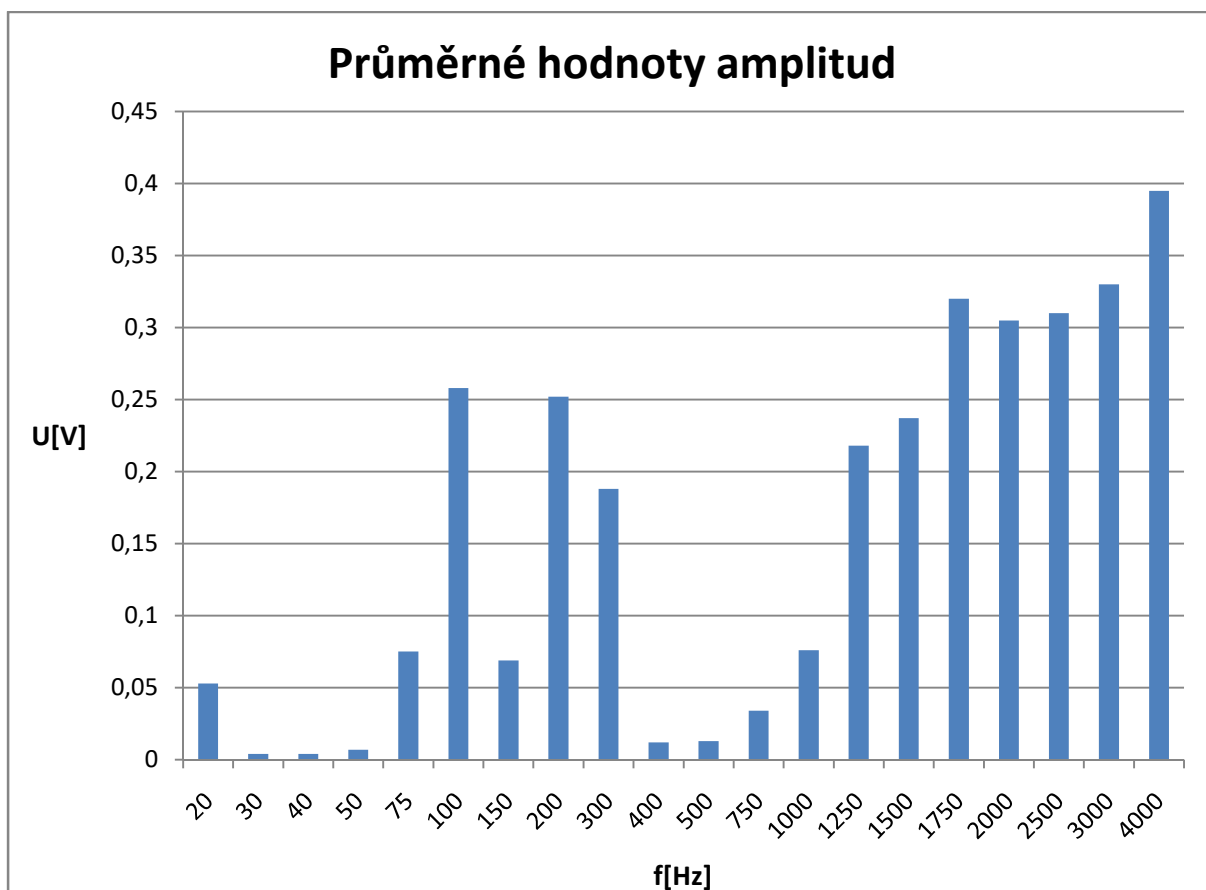
Obrázek 4.11: Použitý typ fotodetektoru

4.2.2 Analýza průměrných hodnot amplitud pro Michelsonův interferometr

Hodnoty uvedené v tabulce jsou výsledky hodnot amplitud pro každou frekvenci Michelsonova interferometru. Bylo provedeno deset měření pro každou uvedenou frekvenci a každý náměř pečlivě analyzován po desítkách sekund. Výsledky jsem zaznamenal a vnesl do grafu Obr. 4. 12. Z uvedených hodnot je vidět, že Michelsonův interferometr je nejcitlivější pro frekvence od 1250 Hz a výš. Z grafu můžeme zpozorovat, že od 20 do 75 Hz a od 400 do 1000 Hz má Michelsonův interferometr nejnižší amplitudovou odezvu a je pro měření vibrací na těchto frekvencích nevhodný. Dále v tabulce uvádím rozptyl hodnot naměřených a analyzovaných amplitud.

Tabulka 4.1: *Průměrné hodnoty amplitud pro Michelsonův interferometr*

f[Hz]/č. měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr [V]	Rozptyl [V]
20	0,057	0,056	0,049	0,045	0,040	0,060	0,048	0,064	0,039	0,073	0,053	103,746·10⁻⁶
30	0,003	0,005	0,007	0,002	0,006	0,004	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	2,0394·10⁻⁶
40	0,004	0,004	0,006	0,003	0,006	0,003	0,003	0,006	0,004	0,004	0,004	0,91490·10⁻⁶
50	0,008	0,005	0,006	0,010	0,004	0,008	0,010	0,005	0,007	0,007	0,007	3,7674·10⁻⁶
75	0,058	0,103	0,075	0,085	0,074	0,072	0,053	0,073	0,091	0,065	0,075	204,1·10⁻⁶
100	0,286	0,234	0,302	0,270	0,183	0,219	0,314	0,195	0,354	0,223	0,258	2,818065·10⁻³
150	0,069	0,070	0,057	0,077	0,083	0,068	0,073	0,060	0,073	0,064	0,069	53,1256·10⁻⁶
200	0,319	0,233	0,260	0,308	0,306	0,269	0,303	0,358	0,276	0,293	0,292	1,082276·10⁻³
300	0,173	0,200	0,134	0,164	0,213	0,190	0,203	0,165	0,230	0,214	0,188	768,453·10⁻⁶
400	0,015	0,018	0,013	0,012	0,011	0,015	0,010	0,009	0,010	0,010	0,012	7,7975·10⁻⁶
500	0,012	0,012	0,014	0,013	0,018	0,005	0,019	0,013	0,010	0,013	0,013	12,5108·10⁻⁶
750	0,029	0,035	0,039	0,038	0,035	0,035	0,034	0,030	0,029	0,033	0,034	10,665·10⁻⁶
1000	0,069	0,088	0,074	0,084	0,072	0,084	0,070	0,070	0,075	0,077	0,076	41,6056·10⁻⁶
1250	0,276	0,195	0,219	0,221	0,249	0,200	0,223	0,186	0,219	0,194	0,218	681,535·10⁻⁶
1500	0,305	0,263	0,263	0,193	0,190	0,260	0,235	0,233	0,225	0,200	0,237	1,21775·10⁻³
1750	0,346	0,285	0,305	0,360	0,239	0,359	0,295	0,278	0,373	0,360	0,320	1,862953·10⁻³
2000	0,305	0,225	0,309	0,336	0,315	0,340	0,315	0,333	0,240	0,333	0,305	1,455312·10⁻³
2500	0,360	0,353	0,289	0,266	0,264	0,363	0,306	0,365	0,266	0,273	0,310	1,792516·10⁻³
3000	0,414	0,289	0,348	0,415	0,365	0,304	0,295	0,215	0,274	0,384	0,330	3,866391·10⁻³
4000	0,425	0,350	0,353	0,400	0,455	0,295	0,385	0,403	0,461	0,423	0,395	2,365766·10⁻³



Obrázek 4.12: Průměrné hodnoty amplitud pro každou frekvenci

4.2.3 Analýza SNR pro Michelsonův interferometr

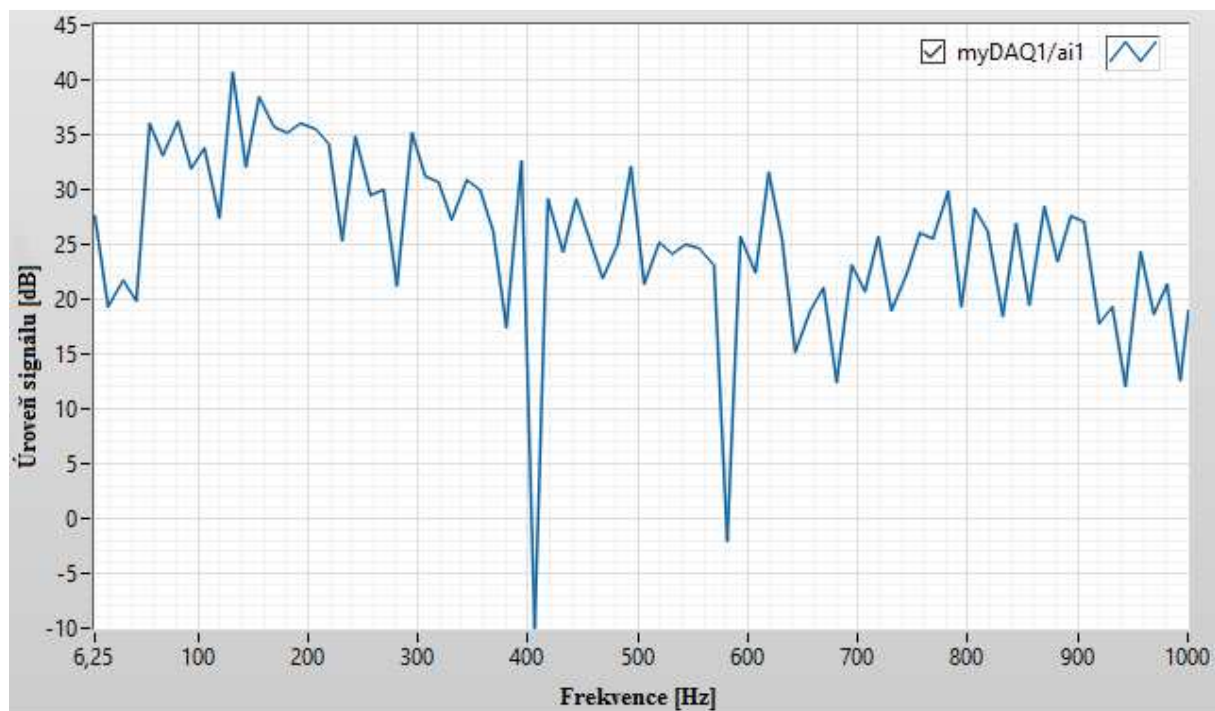
V následujících dvou tabulkách je zaznamenáno a v grafu graficky znázorněn odstup signálu od šumu. Ve výsledcích jde vidět, že na frekvencích, kde má Michelsonův interferometr nejmenší amplitudovou odezvu, je signál zašuměn nejvíce, a tak je potvrzeno i touto analýzou, že pro měření na těchto frekvencích je nevhodný. Naopak je měřením potvrzeno, že tento typ interferometru je nejvhodnější na měření na frekvencích od 1250 Hz a výše, kde má interferometr nejvyšší amplitudovou odezvu a signál je zašuměn nejméně.

Tabulka 4.2: *Průměrné hodnoty amplitud v dB pro Michelsonův interferometr*

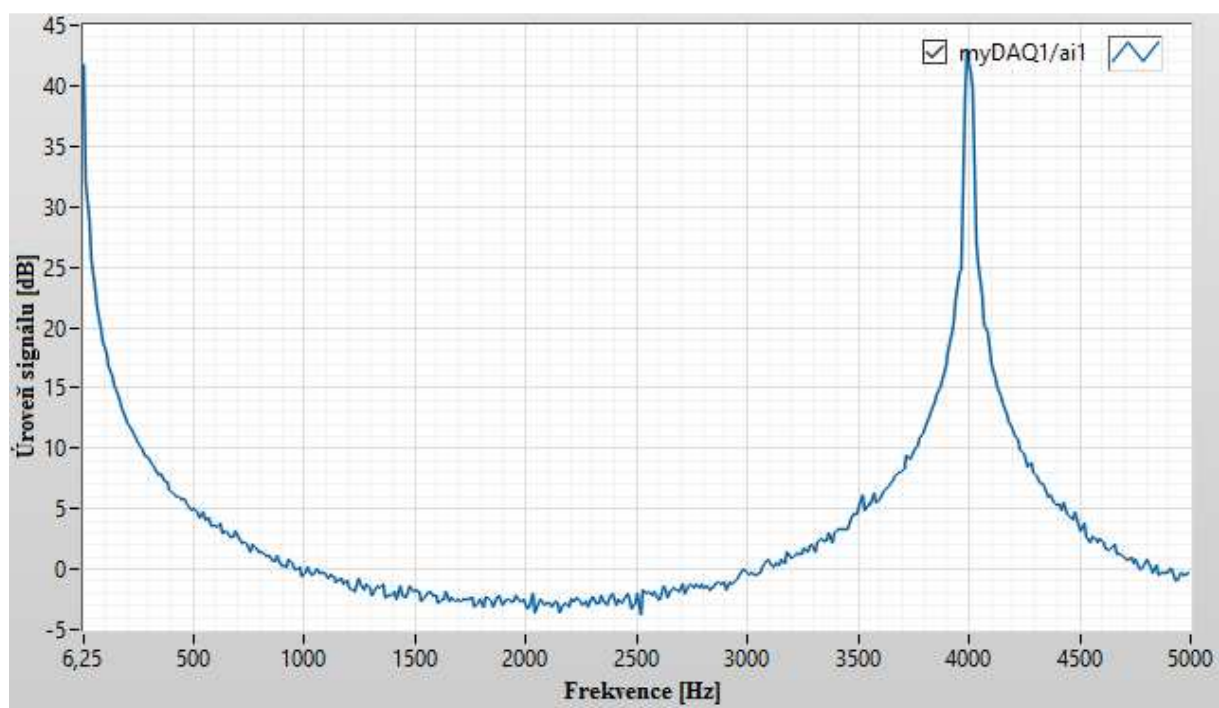
f[Hz]/č. měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr [dB]
20	49,0	47,0	47,5	47,0	48,0	43,0	47,5	48,0	47,5	38,0	45,98
30	28,0	35,5	36,0	32,0	35,0	25,0	38,0	35,0	31,0	26,0	32,15
40	37,0	35,0	30,0	36,0	34,0	28,0	28,0	37,5	34,0	30,0	32,95
50	36,0	30,0	36,0	29,0	35,0	30,0	36,0	34,0	34,0	38,0	33,80
75	42,0	50,0	48,0	38,0	43,0	43,0	50,0	50,0	49,0	50,0	46,30
100	38,0	51,0	50,0	40,0	51,0	51,0	51,0	49,0	50,0	42,0	47,30
150	45,0	40,0	43,0	43,0	40,0	43,0	40,0	44,0	31,0	42,0	41,10
200	48,0	39,0	46,0	50,0	52,0	52,0	42,0	51,0	52,5	51,0	48,35
300	50,0	47,5	45,0	47,0	45,0	44,0	40,0	50,0	47,0	50,0	46,55
400	37,5	40,0	33,0	36,0	27,0	31,0	35,0	34,0	27,0	36,0	33,65
500	28,0	33,0	37,0	35,0	36,0	34,0	36,0	31,0	33,0	30,0	33,30
750	44,0	36,0	32,0	39,0	42,0	44,0	39,0	44,0	44,0	35,0	39,90
1000	41,0	45,0	45,0	45,0	30,0	40,0	45,0	45,0	45,0	47,0	42,80
1250	48,0	47,0	40,0	47,0	47,0	44,0	50,0	50,0	40,0	47,0	46,00
1500	47,0	45,0	43,0	50,0	50,0	49,0	50,0	50,0	50,0	50,0	48,40
1750	52,0	47,0	50,0	47,0	47,0	50,0	53,0	40,0	30,0	52,0	46,80
2000	51,0	52,0	51,0	41,0	45,0	50,0	53,0	50,0	44,0	51,0	48,80
2500	45,0	49,0	51,0	52,0	50,0	50,0	47,0	43,0	49,0	50,0	48,60
3000	52,0	45,0	50,0	52,0	53,0	53,0	45,0	48,0	50,0	40,0	48,80
4000	53,0	43,0	45,0	50,0	53,0	36,0	38,0	52,0	52,0	52,0	47,40

Tabulka 4.3: *Průměrné hodnoty velikosti šumu v dB pro Michelsonův interferometr*

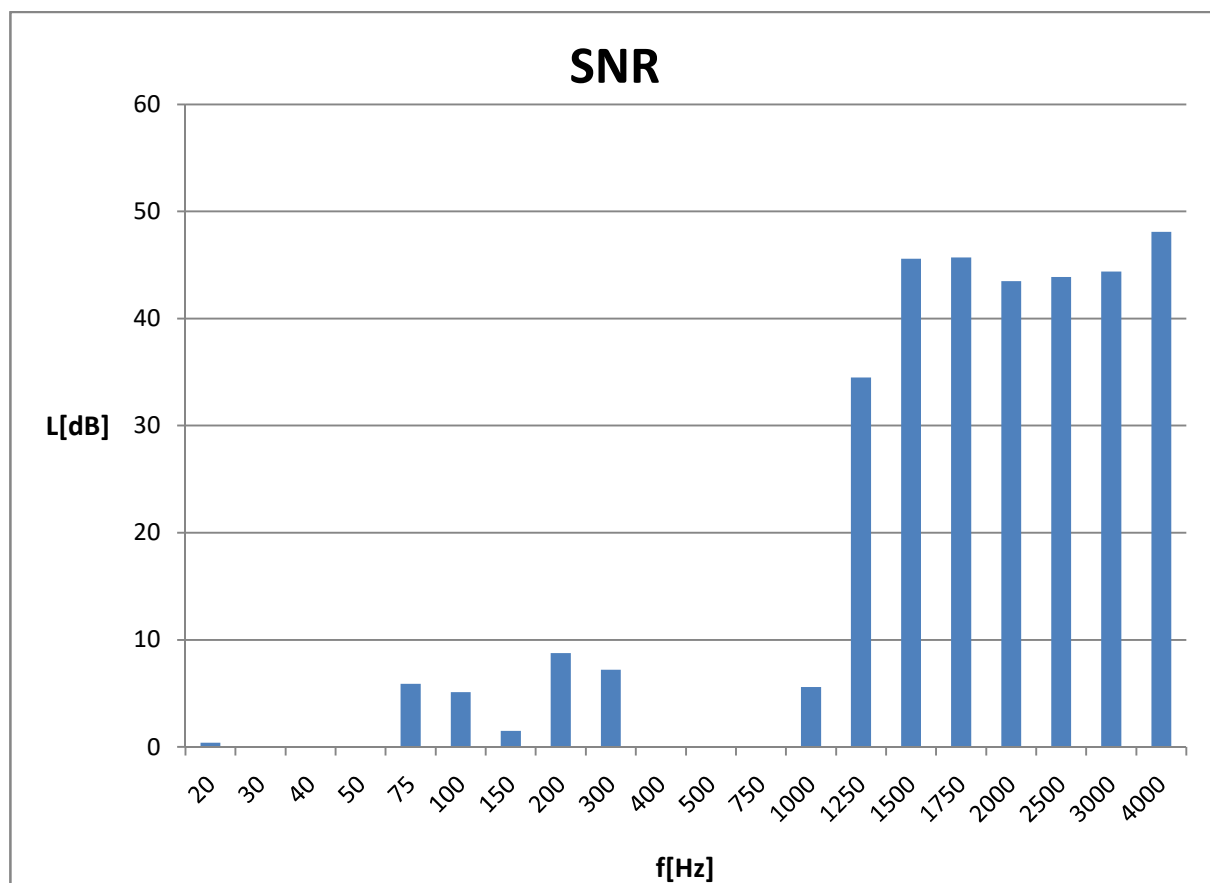
f[Hz]/č. měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr [dB]	Rozdíl [dB]
20	45,0	45,0	43,0	45,0	42,5	47,5	45,0	47,5	47,5	48,0	45,60	0,37
30	41,0	39,0	37,0	39,0	41,0	39,0	38,0	36,5	34,5	39,0	38,40	0
40	41,0	38,0	41,0	41,0	41,0	39,0	39,0	41,0	39,0	41,0	40,10	0
50	42,0	42,0	38,0	41,0	40,0	41,0	41,0	44,0	42,0	42,0	41,30	0
75	44,0	40,0	42,0	43,0	45,0	43,0	37,0	37,0	35,0	38,0	40,40	5,9
100	40,0	43,0	43,0	40,0	43,0	43,0	43,0	41,0	44,0	42,0	42,20	5,1
150	43,0	37,0	41,0	41,0	39,0	41,0	39,0	41,0	34,0	40,0	39,60	1,5
200	30,0	35,0	41,0	42,0	43,0	41,0	42,0	42,0	35,0	45,0	39,60	8,75
300	44,0	42,5	40,0	41,0	39,0	36,0	30,0	41,0	39,0	41,0	39,35	7,2
400	44,0	47,0	43,0	44,0	38,0	39,0	43,0	44,0	41,0	46,0	42,90	0
500	46,0	45,0	36,0	45,0	42,0	45,0	46,0	47,5	48,0	48,0	44,85	0
750	47,0	45,0	38,0	46,0	42,0	47,0	47,0	46,0	47,0	35,0	44,00	0
1000	40,0	43,0	44,0	42,0	30,0	38,0	43,0	30,0	30,0	32,0	37,20	5,6
1250	7,0	20,0	9,0	12,0	8,0	14,0	3,0	5,0	7,0	30,0	11,50	34,5
1500	7,0	10,0	3,0	3,0	5,0	4,0	1,0	-10,0	0,0	5,0	2,80	45,6
1750	0,0	-8,0	4,0	22,0	0,0	0,0	-7,0	-10,0	5,0	5,0	1,10	45,7
2000	15,0	2,0	5,0	-4,0	11,0	7,0	-5,0	25,0	-3,0	0,0	5,30	43,5
2500	0,0	15,0	10,0	0,0	-10,0	25,0	10,0	0,0	2,0	-5,0	4,70	43,9
3000	5,0	-3,0	10,0	0,0	5,0	7,0	10,0	20,0	0,0	-10,0	4,40	44,4
4000	4,0	2,0	-10,0	-10,0	5,0	0,0	-3,0	2,0	5,0	-2,0	-0,70	48,1



Obrázek 4.13: Ukázka zašuměného signálu pro 50 Hz



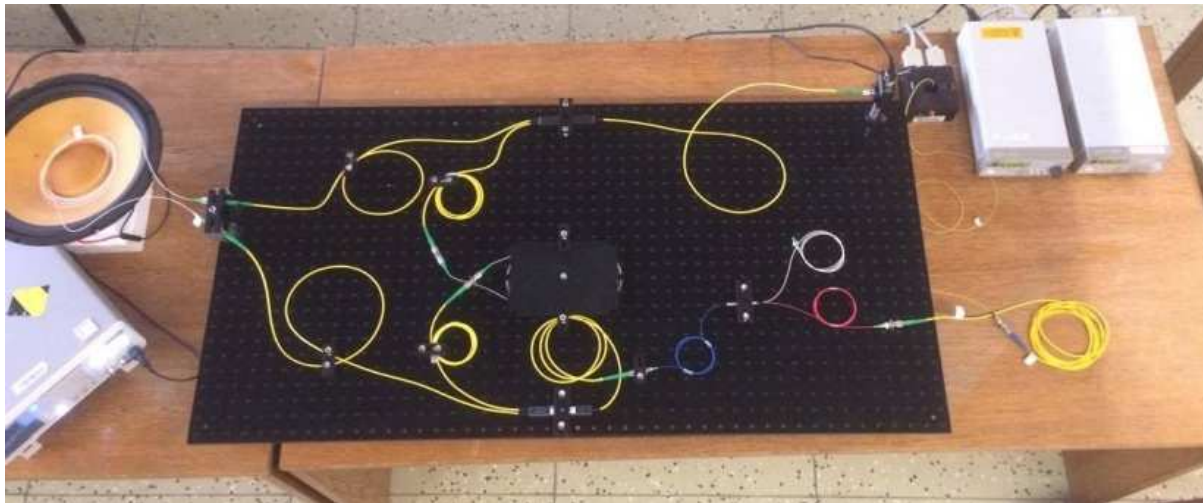
Obrázek 4.14: Ukázka signálu s nízkou úrovní šumu pro 4000 Hz



Obrázek 4.15: Odstup signálu od šumu pro každou frekvenci v dB

4.2.4 Mach-Zehnderův interferometr

Pro měření Mach-Zehnderovým interferometrem jsem použil totožné zapojení, jako pro měření vibrační odezvy při dopadu předmětů. Jediným rozdílem je, že měřící rameno není připevněno na skleněné desce, ale je položeno na reproduktoru jak je vidět na obr. 4.16.



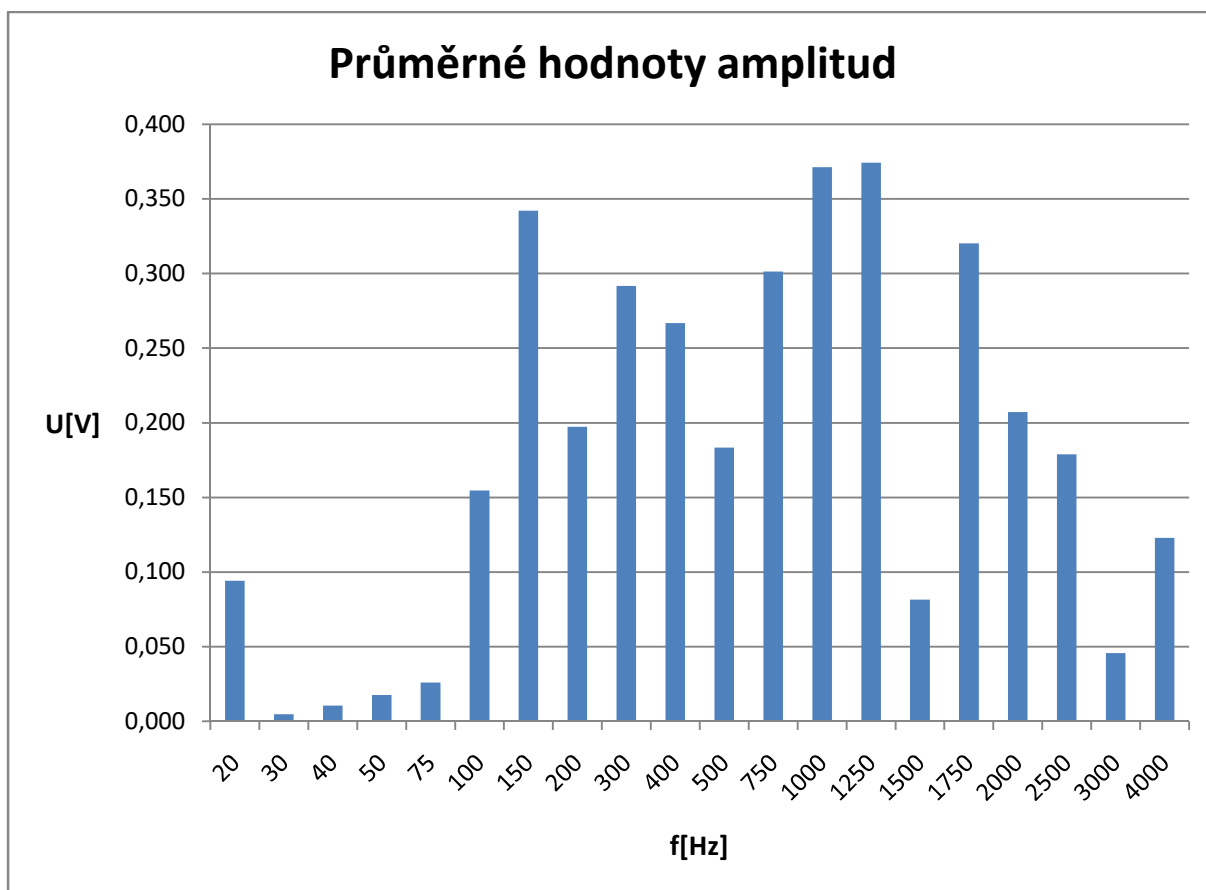
Obrázek 4.16: *Zapojení Mach-Zehnderova interferometru.*

4.2.5 Analýza průměrných hodnot amplitud pro Mach-Zehnderův interferometr

Hodnoty uvedené v tabulce jsou výsledky hodnot amplitud pro každou frekvenci Mach-Zehnderova interferometru. Bylo provedeno deset měření pro každou uvedenou frekvenci a každý náměr byl pečlivě analyzován po desítkách sekund. Výsledky jsem zaznamenal a vnesl do grafu obr. 4.17. Z uvedených hodnot je vidět, že Mach-Zehnderův interferometr je nejcitlivější pro střed zadaného frekvenčního rozsahu. Z grafu můžeme zpozorovat, že od 20 do 75 Hz má Mach-Zehnderův interferometr nejnížší amplitudovou odezvu a pro měření vibrací na těchto frekvencích je nevhodný. Dále v tabulce uvádím rozptyl hodnot naměřených a analyzovaných amplitud.

Tabulka 4.4: *Průměrné hodnoty amplitud pro Mach-Zehndrův interferometr*

f[Hz]/č. měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr [V]	Rozptyl [V]
20	0,126	0,095	0,063	0,079	0,086	0,112	0,092	0,090	0,102	0,098	0,094	250,639·10⁻⁶
30	0,005	0,004	0,004	0,003	0,004	0,006	0,004	0,004	0,007	0,006	0,005	1,11534·10⁻⁶
40	0,013	0,011	0,015	0,006	0,018	0,009	0,012	0,008	0,007	0,007	0,011	11,899,2·10⁻⁶
50	0,016	0,011	0,022	0,014	0,019	0,020	0,024	0,019	0,020	0,010	0,017	17,2804·10⁻³
75	0,043	0,042	0,047	0,024	0,021	0,019	0,015	0,018	0,017	0,017	0,026	129,637·10⁻⁶
100	0,155	0,166	0,161	0,161	0,120	0,200	0,175	0,133	0,145	0,130	0,155	462,23·10⁻⁶
150	0,298	0,390	0,306	0,383	0,395	0,253	0,336	0,301	0,290	0,470	0,342	3,527571·10⁻³
200	0,275	0,195	0,155	0,195	0,198	0,168	0,145	0,138	0,250	0,255	0,197	1,922102·10⁻³
300	0,325	0,239	0,425	0,355	0,243	0,220	0,221	0,355	0,280	0,255	0,292	3,973068·10⁻³
400	0,249	0,365	0,353	0,213	0,305	0,219	0,163	0,350	0,170	0,283	0,267	4,677045·10⁻³
500	0,160	0,160	0,220	0,213	0,199	0,190	0,195	0,148	0,168	0,183	0,183	476,151·10⁻⁶
750	0,423	0,256	0,380	0,298	0,245	0,250	0,256	0,290	0,279	0,338	0,301	2,973139·10⁻³
1000	0,343	0,413	0,410	0,380	0,308	0,430	0,388	0,298	0,389	0,355	0,371	1,633156·10⁻³
1250	0,369	0,500	0,403	0,308	0,348	0,400	0,315	0,374	0,343	0,385	0,374	2,464143·10⁻³
1500	0,152	0,103	0,076	0,138	0,044	0,061	0,053	0,051	0,054	0,084	0,081	1,179872·10⁻³
1750	0,363	0,353	0,366	0,323	0,290	0,280	0,325	0,325	0,263	0,315	0,320	994,861·10⁻⁶
2000	0,610	0,340	0,318	0,178	0,173	0,134	0,105	0,036	0,078	0,103	0,207	24,27125·10⁻³
2500	0,240	0,358	0,353	0,308	0,336	0,030	0,049	0,034	0,047	0,034	0,179	18,69635·10⁻³
3000	0,030	0,063	0,068	0,066	0,033	0,041	0,029	0,040	0,044	0,045	0,046	176,796·10⁻⁶
4000	0,133	0,107	0,143	0,122	0,113	0,086	0,129	0,164	0,110	0,123	0,123	370,211·10⁻⁶



Obrázek 4.17: Průměrné hodnoty amplitud pro každou frekvenci

4.2.6 Analýza SNR pro Mach-Zehnderův interferometr

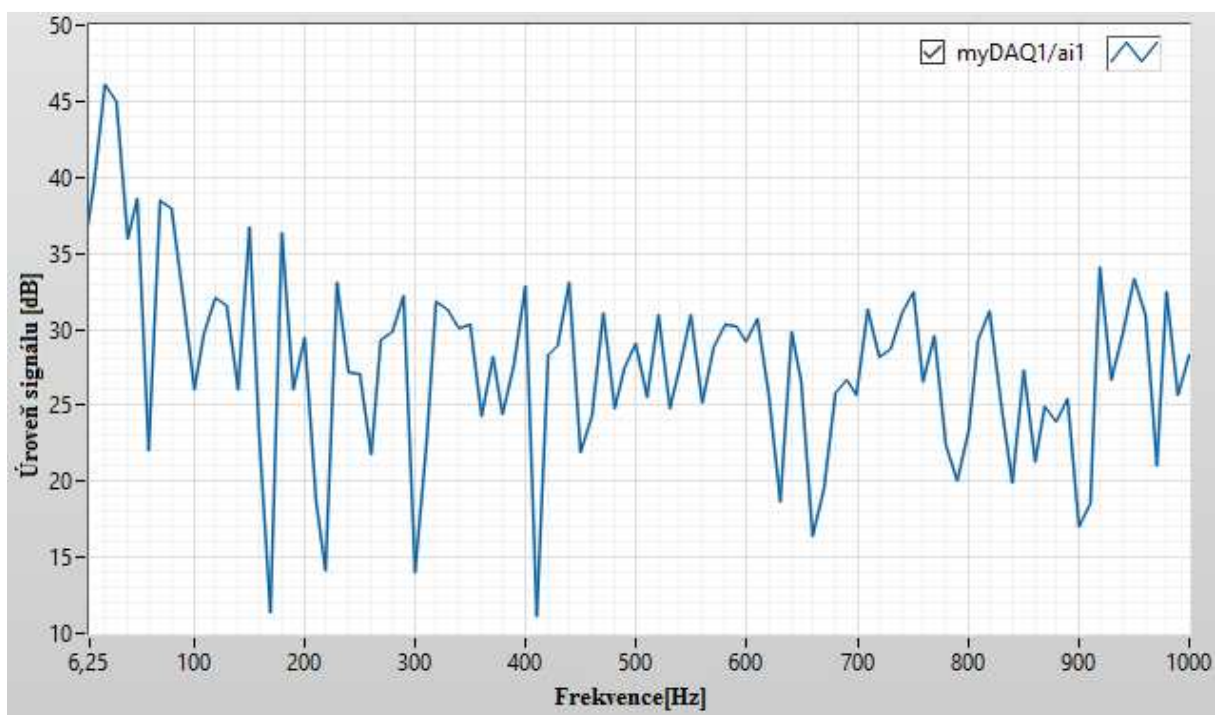
V následujících dvou tabulkách je zaznamenáno a v grafu graficky znázorněn odstup signálu od šumu. Ve výsledcích jde vidět, že na frekvencích, kde má Michelsonův interferometr nejmenší amplitudovou odezvu, je signál zašuměn nejvíce, a tak je potvrzeno i touto analýzou, že pro měření na těchto frekvencích je nevhodný. Naopak je měřením potvrzeno, že tento typ interferometru je nejvhodnější na měření na frekvencích od 1250 Hz a výše, kde má interferometr nejvyšší amplitudovou odezvu a signál je zašuměn nejméně.

Tabulka 4.5: *Průměrné hodnoty amplitud v dB pro Mach-Zehnderův interferometr*

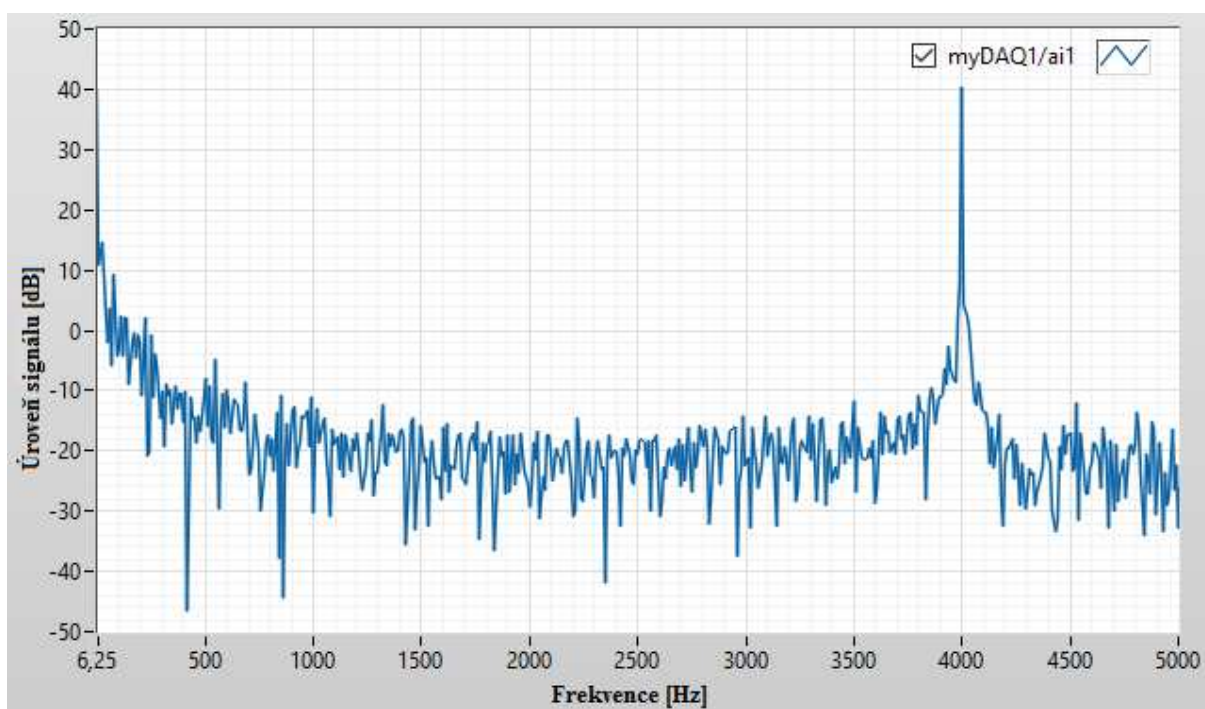
f[Hz]/č. měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr [dB]
20	41,0	51,0	50,0	45,0	48,0	48,0	45,0	52,0	47,0	47,0	47,40
30	36,0	39,0	27,0	38,0	39,0	38,0	40,0	34,0	38,0	41,0	37,00
40	37,5	39,0	44,0	34,0	40,0	38,0	42,0	37,5	40,0	32,0	38,40
50	38,0	10,0	40,0	46,0	43,0	45,0	35,0	36,0	44,0	42,0	37,90
75	47,0	48,0	48,0	34,0	44,0	43,0	45,0	37,5	35,0	20,0	40,15
100	51,0	51,0	50,0	50,0	53,0	53,0	52,0	50,0	53,0	53,0	51,60
150	35,0	56,0	45,0	55,0	53,0	56,0	57,0	55,0	49,0	57,0	51,80
200	47,0	45,0	50,0	55,0	55,0	52,0	52,0	34,0	51,0	55,0	49,60
300	51,0	55,0	55,0	51,0	52,0	50,0	53,0	45,0	50,0	47,0	50,90
400	40,0	51,0	50,0	56,0	55,0	55,0	37,0	55,0	55,0	35,0	48,90
500	57,0	57,0	51,0	53,0	52,0	54,0	55,0	57,0	53,0	53,0	54,20
750	55,0	55,0	56,0	55,0	51,0	55,0	54,0	53,0	50,0	55,0	53,90
1000	59,0	56,0	55,0	56,0	58,0	59,0	58,0	58,0	58,0	55,0	57,20
1250	52,0	56,0	57,0	58,0	55,0	52,0	57,0	55,0	55,0	55,0	55,20
1500	55,0	52,0	50,0	50,0	40,0	46,0	40,0	47,0	47,0	49,0	47,60
1750	58,0	58,0	58,0	55,0	52,0	51,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,20
2000	59,0	59,0	40,0	50,0	50,0	51,0	50,0	38,0	50,0	50,0	49,70
2500	45,0	42,0	44,0	50,0	50,0	48,0	41,0	42,0	50,0	48,0	46,00
3000	31,0	45,0	30,0	50,0	42,0	50,0	41,0	40,0	45,0	40,0	41,40
4000	32,0	40,0	40,0	35,0	50,0	52,0	30,0	53,0	52,0	50,0	43,40

Tabulka 4.6: *Průměrné hodnoty velikosti šumu v dB pro Mach-Zehnderův interferometr*

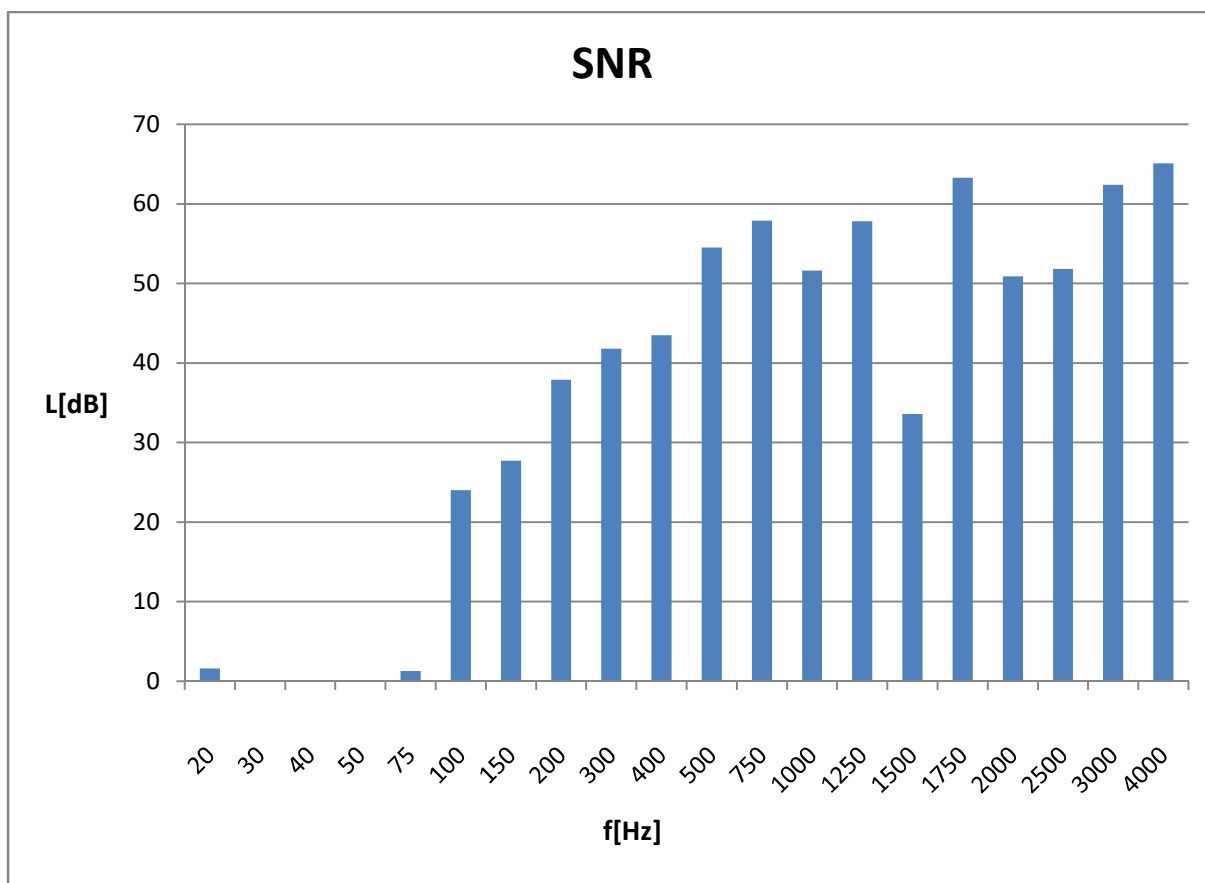
f[Hz]/č. měř.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr [V]	Rozdíl [dB]
20	48,0	47,0	45,0	46,0	45,0	48,0	47,0	40,0	45,0	47,0	45,80	1,6
30	37,0	39,0	39,0	38,0	39,0	42,0	42,0	39,0	37,5	37,5	39,00	0
40	37,5	38,0	38,0	42,0	38,0	38,0	41,0	34,0	38,0	38,0	38,25	0,2
50	45,5	40,0	45,0	40,0	39,0	38,0	34,0	30,0	38,0	36,0	38,55	0
75	39,0	40,0	43,0	35,0	37,5	40,0	40,0	38,0	45,0	31,0	38,85	1,3
100	40,0	37,0	40,0	26,0	30,0	23,0	20,0	20,0	20,0	20,0	27,60	24
150	25,0	17,0	27,0	25,0	20,0	27,0	25,0	27,0	27,0	21,0	24,10	27,7
200	20,0	5,0	10,0	8,0	5,0	12,0	10,0	17,0	15,0	15,0	11,70	37,9
300	10,0	14,0	20,0	7,0	10,0	0,0	5,0	5,0	20,0	0,0	9,10	41,8
400	5,0	0,0	-10,0	10,0	8,0	-3,0	15,0	10,0	10,0	9,0	5,40	43,5
500	10,0	10,0	-10,0	-8,0	-5,0	15,0	0,0	-10,0	0,0	-5,0	-0,30	54,5
750	-10,0	-10,0	-10,0	-10,0	5,0	-10,0	-5,0	0,0	10,0	0,0	-4,00	57,9
1000	-15,0	0,0	5,0	10,0	8,0	10,0	8,0	10,0	10,0	10,0	5,60	51,6
1250	10,0	-10,0	-5,0	4,0	10,0	0,0	-10,0	-10,0	-10,0	-5,0	-2,60	57,8
1500	0,0	-10,0	15,0	20,0	15,0	25,0	20,0	15,0	20,0	20,0	14,00	33,6
1750	-20,0	-4,0	-15,0	0,0	10,0	-7,0	-10,0	-15,0	-10,0	-10,0	-8,10	63,3
2000	-15,0	-10,0	10,0	-5,0	0,0	8,0	0,0	0,0	-5,0	5,0	-1,20	50,9
2500	18,0	12,0	10,0	-20,0	-20,0	-15,0	-20,0	2,0	-15,0	-10,0	-5,80	51,8
3000	-25,0	-30,0	-5,0	-20,0	-20,0	-25,0	-20,0	-20,0	-25,0	-20,0	-21,00	62,4
4000	-25,0	-15,0	-25,0	-22,0	-20,0	-25,0	-20,0	-25,0	-20,0	-20,0	-21,70	65,1



Obrázek 4.18: Ukázka zašuměného signálu pro 50Hz



Obrázek 4.19: Ukázka signálu se šumem pro 4000Hz



Obrázek 4.20: Odstup signálu od šumu pro každou frekvenci v dB

Závěr

Bakalářská práce se věnuje sestavení prototypu Mach-Zehnderova a Michelsonova interferometru a jejich následné testování citlivosti na vibrační odezvu.

V úvodu teoretické části jsem se věnoval základním informacím týkající se světla. V další části jsem popsal optická vlákna, jejich rozdělení a základní jevy probíhající uvnitř optického vlákna. V poslední teoretické části jsem se již věnoval interferometrům, jejich principu funkce a uvedl dva interferometry, které jsou využívány pro měření v praktické části práce.

Po sepsání rešerše teoretické části jsem sepsal úvod do měření a seznámil jsem se se schématy a všemi potřebnými komponenty, potřebnými k sestavení dvou uvedených interferometrů.

V praktické části jsem prvně okomentoval způsob sestavení obou přístrojů. Následně se již věnuji konkrétnímu měření a to Michelsonovu interferometru.

První způsob testování zahrnuje dopad různých předmětů na skleněnou tabuli o tloušťce 5 mm, kde jsem postupně pouštěl předměty z výšky 1 m a zaznamenával amplitudovou odezvu. Nejprve Michelsonova interferometru. Amplitudová odezva se projevila nejvíce na frekvenci 20 Hz, kde amplituda byla největší pro dopad tenisového míče, poté pro plastelínu a nejmenší amplitudu vytvořil dopad pingpongového míčku.

Stejné měření s dopadem různých předmětů jsem provedl i pro Mach-Zehnderův interferometr, kde výsledky byly téměř totožné, avšak Mach-Zehnderův interferometr vykazoval vyšší amplitudovou odezvu, než interferometr Michelsonův.

Z důvodu, že měření při dopadu různých předmětů vycházelo pro oba typy přístrojů velmi podobně a proto nevyhovující pro srovnávání dvou typů interferometrů, jsem se po konzultaci s vedoucím rozhodl rozšířit rozsah a to tak, že jsem proměřil vibrační odezvu obou interferometrů v rozsahu 20 – 4000 Hz.

První způsob testování s reproduktorem obnášel měření a následné analyzování průměrné amplitudové odezvy pro každou z frekvencí. Průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce a nastíněny v grafu, kompletní hodnoty měření jsou uvedeny v příloze na CD. Z grafu je vidět, že Michelsonův interferometr je nejcitlivější pro frekvence od 100 do 400 Hz, následně pak od 1250 do 4000 Hz. Mezi těmito úseky vykazuje interferometr velice malou amplitudovou odezvu a signál je zašuměn.

Druhým způsobem testování s reproduktorem je SNR (odstup signálu od šumu). Naměřené hodnoty jsou opět vneseny do tabulek a grafu. Z grafu je patrné, že na frekvencích, kde Michelsonův interferometr vykazoval nejnižší amplitudovou odezvu je signál zašuměn nejvíce a odstup signálu od šumu je minimální. Naopak v úseku od 1250 Hz, kdy je amplitudová odezva nejvyšší je odstup signálu od šumu daleko větší.

Po dokončení analýzy Michelsonova interferometru jsem zahájil testování Mach-Zehnderova interferometru a to stejným způsobem.

Prvním způsobem testování je opět amplitudová odezva na vytvářené vibrace pomocí reproduktoru pro každou frekvenci. Výsledky jsou vneseny do tabulek a grafu. Z grafu můžeme pozorovat, že amplitudová odezva pro frekvence od 20 do 100 Hz je stejně nízká jako u prvního typu

interferometru. Avšak Mach-Zehnderův vykazuje až na pár výjimek podstatně vyšší pokrytí frekvencí, na kterých je citlivý než první typ interferometru.

Druhým způsobem testování pomocí reproduktoru, stejně jako u prvního přístroje, je analýza odstupu signálu od šumu. Vyhodnocení je opět vneseno do grafu, ze kterého je patrné, že Mach-Zehnderův interferometr dopadl v mých testech podstatně lépe, kdy od 100 Hz a výše je odstup signálu od šumu dostačující, aby byl interferometr dostatečně citlivý pro přesná měření.

Díky provedení rozšíření a měření jsem zjistil, že hodnoty amplitudové odezvy a odstupu signálu od šumu jsou u obou interferometrů odlišné a tak jsem mohl oba interferometry porovnat v plném rozsahu.

Použitá literatura

- [1] BEECH, Martin. *The physics of invisibility: a story of light and deception*. New York: Springer, c2012. ISBN 978-1-4614-0615-0.
- [2] Isaac Newton: Optika, aneb historie pátrání po podstatě světla. *Scienceworld* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/isaac-newton-optika-aneb-historie-patrani-po-podstate-svetla-2204/>
- [3] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [4] ŠÍŠKA, Petr. *Optoelektronika*. Ostrava. Výukový materiál. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [5] *Properties of Light* [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.physicsplanet.com/articles/properties-of-light>
- [6] WOODFORD, Chris. *Fiber optics* [online]. 2006/2016 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.explainthatstuff.com/fiberoptics.html>
- [7] GOODWIN, Eric P. a James C. WYANT. *Field guide to interferometric optical testing*. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108.
- [8] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl. TEICH. *Fundamentals of photonics*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley Interscience, 2007. ISBN 9780471358329.
- [9] Polarizace světla. Gymnázium Ladislava Jaroše Holešov. [online]. 18. 4. 2017 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/10_polar/10_polar.htm
- [10] Interference. Optika jednoduše. [online]. 18. 4. 2017 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://optika.kuratkoo.net/interference.htm>
- [11] *Lifewire* [online]. 2016 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/signal-to-noise-ratio-3134701>

Příloha na CD

Příloha A1: Naměřené hodnoty pro Michelsonův interferometr

Příloha A2: Naměřené hodnoty pro Mach-Zehnderův interferometr

Adresářová struktura přiloženého CD:

```
CD:.  
|  
+---Příloha A.1  
|     Michelson.PDF  
|  
\---Příloha A.2  
      Mach-Zehnder.PDF
```